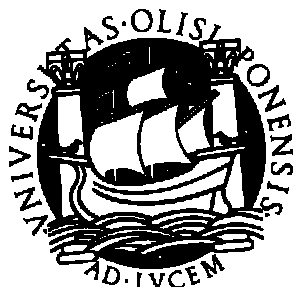


UNIVERSIDADE DE LISBOA  
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO



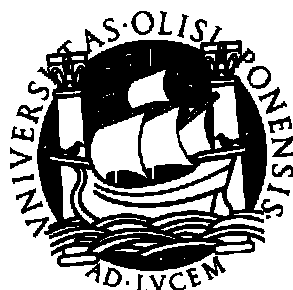
**AS CHEIAS RÁPIDAS EM  
BACIAS HIDROGRÁFICAS DA AML NORTE:  
FACTORES CONDICIONANTES E DESENCADEANTES**

**Miguel Henrique Alfaia Leal**

**MESTRADO EM GEOGRAFIA FÍSICA E  
ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO**

2011

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO



**AS CHEIAS RÁPIDAS EM  
BACIAS HIDROGRÁFICAS DA AML NORTE:  
FACTORES CONDICIONANTES E DESENCADEANTES**

**Miguel Henrique Alfaia Leal**

**MESTRADO EM GEOGRAFIA FÍSICA E  
ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO**

Dissertação orientada pela  
Prof. Doutora Catarina Ramos

2011



*In rivers, the water that you touch is the last of what has passed  
and the first of that which comes.*

Leonardo da Vinci

## AGRADECIMENTOS

Um trabalho deste género é, forçosamente, um esforço solitário, que vive sobretudo à custa da dedicação de uma pessoa, mas que é enriquecido pelo contributo e auxílio de um conjunto de pessoas. A todas elas: muito obrigado!

A minha orientadora que me perdoe, mas o primeiro e maior agradecimento vai para os meus pais, que me deram total liberdade para escolher o meu futuro e que me possibilitaram frequentar a licenciatura e o mestrado. A melhor forma de lhes agradecer foi com o empenho e a abnegação que me trouxeram até aqui. Sei que eles não me iriam pedir mais e acho que não os desiludi.

Agora sim, um grande agradecimento à Prof. Dra. Catarina Ramos pela disponibilidade e paciência que teve ao longo dos meses de elaboração desta dissertação. O seu conhecimento e as suas palavras de confiança e de estímulo foram, de facto, essenciais para a concretização deste objectivo.

Também quero deixar uma palavra de gratidão ao Prof. Dr. Eusébio Reis pela informação em formato digital que me forneceu, e que foi indispensável para a realização do trabalho.

Ao meu colega Bruno Meneses gostava igualmente de agradecer a enorme paciência que teve para me ajudar a resolver alguns problemas e dúvidas relacionados com o *ArcGIS*.

Estou também muito grato à minha amiga Diana pela ajuda prestada, mesmo a muitos quilómetros de distância. Quero agradecer-lhe ainda todo o apoio e preocupação demonstrados durante todo este tempo.

Por último, mas não menos importante, é o agradecimento que gostava de deixar à minha amiga Patrícia. O seu auxílio na realização de algumas tarefas foi fundamental, assim como os conselhos e incentivos em momentos decisivos deste percurso.

## RESUMO

As cheias na Área Metropolitana de Lisboa (AML) e, particularmente, na AML Norte, ocorrem com alguma frequência, tornando-a uma região de elevado interesse científico.

Foram escolhidas 12 pequenas bacias hidrográficas aí localizadas (Colares, Vinhas, Caparide, Laje, Barcarena, Jamor, Trancão (bacia), Trancão (sub-bacia), Póvoa, Loures, Fanhões e Alpriate), para se avaliarem os factores condicionantes das cheias em cada uma delas. Foram estudadas as características físicas (geometria, substrato geológico, relevo e rede de drenagem) de cada uma das bacias, o que permitiu estabelecer uma classificação de susceptibilidade natural às cheias. Também foram analisadas as componentes variáveis (uso do solo), constituindo-se uma classificação de susceptibilidade antrópica. A avaliação dos factores condicionantes das bacias, expressa pela susceptibilidade final, resultou da combinação entre as componentes permanentes e variáveis.

Analisou-se igualmente a evolução da ocupação dos leitos de cheia das bacias hidrográficas estudadas entre 1990 e 2006, o que permitiu detectar uma situação continuada de desordenamento das áreas ribeirinhas.

O estudo dos factores desencadeantes é outra parte importante deste trabalho. Utilizaram-se 7 estações meteorológicas da rede do INAG: Arranhó, Cacém, Caneças, Milharado, Quinta do Pisão, Sacavém de Cima e São Julião do Tojal. Os dados de precipitação são de particular relevância na AML Norte porque praticamente não existem dados hidrométricos, o que limita o processo de investigação. Foram, por isso, analisadas as precipitações intensas nessas 7 estações, de modo a serem obtidos padrões de distribuição espacial e temporal, assim como os períodos de retorno.

Procurou-se perceber quais as bacias mais afectadas pelas cheias e quais os meses em que estas mais ocorrem. Devido às limitações impostas pelos escassos registos de caudais, também o estudo das cheias ocorridas foi efectuado com base nos dados de precipitação. Foi dada especial atenção às cheias de 1967, 1983 e 2008. O facto de estarem disponíveis dados horários de precipitação para 2008, permitiu investigar este evento com maior detalhe.

Por fim, a utilização de métodos empíricos permitiu calcular os caudais de ponta de cheia nas várias bacias para diversas durações e estimar os impactes do crescimento urbano nos respectivos comportamentos hidrológicos, designadamente nos tempos de concentração.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cheias rápidas; bacias hidrográficas; factores condicionantes; factores desencadeantes; AML Norte

## **ABSTRACT**

The floods in Lisbon Metropolitan Area (LMA) and, particularly, in LMA North occur frequently. Therefore, this region has a high scientific interest.

To evaluate the conditioning factors of floods 12 small drainage basins in LMA North were chosen: Colares, Vinhas, Caparide, Laje, Barcarena, Jamor, Trancão (basin), Trancão (sub-basin), Póvoa, Loures, Fanhões and Alpriate. Their physical characteristics (geometry, geological substrate, relief and drainage network) were studied to create a classification of flood natural susceptibility. Their variable components (land use) were also analysed to develop a classification of anthropogenic susceptibility. The evaluation of conditioning factors, expressed by final susceptibility, was done by the combination of permanent and variable components.

The floodplains occupation and its evolution between 1990 and 2006 were also checked. This allowed us to detect a continuous situation of riverine mismanagement.

The triggering factors analysis is another important part of this work. Seven meteorological stations were used: Arranhó, Cacém, Caneças, Milharado, Quinta do Pisão, Sacavém de Cima and São Julião do Tojal. The rainfall data are especially important in LMA North because there are almost no hydrometric data, which had limited the research process. Therefore, the heavy rainfall on these seven stations was examined to obtain its spatial and temporal distribution, as well as the return periods.

We tried to understand which are the drainage basins more affected by the floods and which are the months with more floods. Due to the limitations imposed by scarce discharge records, the study of floods was also based on rainfall data. Special attention was given to the floods of 1967, 1983 and 2008. The existence of hourly precipitation data for 2008 allowed us a more detailed investigation of this event.

Finally, the use of empirical methods permitted us to calculate the flood peak discharges in the aforementioned drainage basins and to estimate the impacts of urban growth in their hydrologic behaviour, particularly in concentration times.

**KEYWORDS:** Flash floods; drainage basins; conditioning factors; triggering factors; LMA North



## ÍNDICE

Agradecimentos .....	IV
Resumo .....	V
Abstract .....	VI
Índice .....	VIII
Índice de figuras .....	X
Índice de quadros .....	XII

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
-------------------------	----------

<b>CAPÍTULO I – ENQUADRAMENTO TEÓRICO E METODOLÓGICO .....</b>	<b>9</b>
--	----------

1. ESTADO DA ARTE .....	9
2. METODOLOGIA .....	22
2.1. Recolha de informação .....	22
2.2. Tratamento da informação .....	23
2.3. Dificuldades e obstáculos .....	39

<b>CAPÍTULO II – FACTORES CONDICIONANTES DAS CHEIAS .....</b>	<b>41</b>
---	-----------

1. FACTORES PERMANENTES .....	41
1.1. Geometria .....	41
1.2. Substrato geológico .....	47
1.3. Relevo .....	56
1.4. Rede de drenagem .....	62
1.5. Susceptibilidade natural das bacias hidrográficas .....	67
2. FACTORES VARIÁVEIS: EVOLUÇÃO DO USO DO SOLO .....	69
2.1. Áreas edificadas .....	70
2.2. Áreas agrícolas .....	78
2.3. Áreas florestais e silvestres .....	80
2.4. Susceptibilidade antrópica das bacias hidrográficas .....	82
3. AVALIAÇÃO DOS FACTORES CONDICIONANTES .....	86

4. OS TEMPOS DE CONCENTRAÇÃO/DE RESPOSTA E OS CAUDAIS DE PONTA DE CHEIA DAS BACIAS .....	88
5. AS ZAC: OCUPAÇÃO E TENDÊNCIAS EVOLUTIVAS .....	91
6. SÍNTESE DO CAPÍTULO II .....	96
<b>CAPÍTULO III – FACTORES DESENCADEANTES DAS CHEIAS .....</b>	<b>99</b>
1. PRECIPITAÇÃO .....	100
1.1. Distribuição da precipitação na AML Norte .....	100
1.2. Análise das precipitações intensas .....	103
1.3. Períodos de retorno .....	105
2. RELAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO E AS CHEIAS .....	107
2.1. Eventos ocorridos nas bacias estudadas .....	108
2.2. As cheias de 18 de Fevereiro de 2008 .....	117
3. SÍNTESE DO CAPÍTULO III .....	124
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>127</b>
Referências bibliográficas .....	131
Sites consultados .....	137
Legislação consultada .....	137

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Relevo da AML Norte .....	3
Figura 2 – Precipitação média anual: 1931-1960 .....	4
Figura 3 – Bacias hidrográficas estudadas .....	5
Figura 4 – Influência da forma da bacia no hidrograma de cheia .....	42
Figura 5 – Bacias hidrográficas e respectivas redes de drenagem .....	44
Figura 6 – Análise de clusters (geometria) .....	46
Figura 7 – Influência da permeabilidade da zona vadosa no hidrograma de cheia .....	48
Figura 8 – Geologia das bacias hidrográficas .....	52
Figura 9 – Permeabilidade das bacias hidrográficas .....	54
Figura 10 – Análise de clusters (substrato geológico) .....	55
Figura 11 – Influência do relevo no hidrograma de cheia .....	57
Figura 12 – Relevo das bacias hidrográficas .....	58
Figura 13 – Declives das bacias hidrográficas .....	59
Figura 14 – Análise de clusters (relevo) .....	61
Figura 15 – Influência da rede de drenagem no hidrograma de cheia .....	63
Figura 16 – Análise de clusters (rede de drenagem) .....	66
Figura 17 – Usos do solo em cada bacia .....	70
Figura 18 – Usos do solo em 1990 e 2006 .....	72 e 73
Figura 19 – Modificação do hidrograma de cheia devido à progressiva urbanização de uma bacia hidrográfica .....	74
Figura 20 – Valores médios de velocidade de escoamento superficial em função da inclinação e do uso do solo .....	74
Figura 21 – Percentagem de áreas edificadas nas bacias em 1990 e 2006 .....	75
Figura 22 – Percentagem de áreas agrícolas nas bacias em 1990 e 2006 .....	78
Figura 23 – Percentagem de áreas florestais e silvestres nas bacias em 1990 e 2006 .....	81
Figura 24 – Análise de clusters (uso do solo) .....	86
Figura 25 – Zonas ameaçadas pelas cheias (ZAC) .....	93
Figura 26 – Percentagem de áreas edificadas nas ZAC das bacias em 1990 e 2006 .....	93
Figura 27 – Precipitação média anual e localização das estações meteorológicas .....	101
Figura 28 – Relação entre a precipitação média anual e a altitude das estações .....	101
Figura 29 – Precipitações médias mensais das estações meteorológicas .....	102



Figura 30 – Distribuição das precipitações intensas (acima do P95) ao longo do ano nas estações meteorológicas .....	104
Figura 31 – Número de eventos danosos registrados em cada mês .....	109
Figura 32 – Distribuição espacial das ocorrências registradas em todas as cheias .....	112
Figura 33 – Número de ocorrências por bacia hidrográfica .....	113
Figura 34 – Distribuição espacial das ocorrências aquando das cheias de 1967 .....	115
Figura 35 – Distribuição espacial das ocorrências aquando das cheias de 1983 .....	116
Figura 36 – Intensidade da precipitação entre as 18 horas de dia 17 e as 18 horas de dia 18 .....	118
Figura 37 – Precipitações máximas em 24 horas entre os dias 17 e 18 de Fevereiro de 2008 em diversas estações da rede do INAG e do IM .....	119
Figura 38 – Distribuição da precipitação entre as 12 horas de dia 17 e as 12 horas de dia 18 .....	121

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de uso do solo .....	33
Quadro 2 – Valores do coeficiente de escoamento superficial para cada tipo de ocupação do solo .....	36
Quadro 3 – Resultados dos parâmetros referentes à geometria .....	43
Quadro 4 – Susceptibilidade das bacias às cheias segundo o factor geometria .....	45
Quadro 5 – Valor de permeabilidade das formações geológicas que compõem as bacias estudadas .....	49
Quadro 6 – Resultados dos parâmetros referentes ao substrato geológico .....	50
Quadro 7 – Susceptibilidade das bacias às cheias segundo o factor substrato geológico ....	50
Quadro 8 – Resultados dos parâmetros referentes ao relevo .....	60
Quadro 9 – Susceptibilidade das bacias às cheias segundo o factor relevo .....	60
Quadro 10 – Resultados dos parâmetros referentes à rede de drenagem .....	64
Quadro 11 – Susceptibilidade das bacias às cheias segundo o factor rede de drenagem ....	65
Quadro 12 – Susceptibilidade das bacias às cheias por factor permanente .....	67
Quadro 13 – Valores ponderados de cada bacia por factor permanente .....	67
Quadro 14 – Susceptibilidade natural das bacias às cheias .....	68
Quadro 15 – Evolução das áreas edificadas entre 1990 e 2006 em relação à superfície total da bacia .....	75
Quadro 16 – Evolução das áreas edificadas entre 1990 e 2006 .....	77
Quadro 17 – Evolução das áreas agrícolas entre 1990 e 2006 em relação à superfície total da bacia .....	78
Quadro 18 – Evolução das áreas agrícolas entre 1990 e 2006 .....	79
Quadro 19 – Evolução das áreas florestais e silvestres entre 1990 e 2006 em relação à superfície total da bacia .....	81
Quadro 20 – Evolução das áreas florestais e silvestres entre 1990 e 2006 .....	82
Quadro 21 – Aumento das áreas edificadas em detrimento das áreas agrícolas e/ou das áreas florestais e silvestres .....	83
Quadro 22 – Valores ponderados de cada bacia para os factores variáveis .....	84
Quadro 23 – Susceptibilidade antrópica das bacias às cheias .....	84
Quadro 24 – Valores ponderados de cada bacia para os factores condicionantes .....	87
Quadro 25 – Susceptibilidade das bacias às cheias .....	87
Quadro 26 – Tempos de concentração (Temez) e de resposta .....	89

Quadro 27 – Tempos de concentração (método FAA) e respectivas reduções (%) entre 1990 e 2006 .....	90
Quadro 28 – Caudais de ponta de cheia obtidos do método de Portela e Dias .....	91
Quadro 29 – Aumentos das áreas edificadas nas ZAC das bacias entre 1990 e 2006 .....	95
Quadro 30 – Precipitação média anual e altitude de 7 estações meteorológicas da AML Norte .....	101
Quadro 31 – Valores dos percentis 90 e 95 e extensão das séries de dados das estações meteorológicas .....	103
Quadro 32 – Valores de precipitação diária para diversos períodos de retorno .....	106
Quadro 33 – Diferenças nos valores de precipitação diária entre estações para diversos períodos de retorno .....	107
Quadro 34 – Precipitações diárias e acumuladas de cada evento nas várias estações .....	111
Quadro 35 – Máximos de precipitação registados nas cheias de 1967, 1983 e 2008 .....	119
Quadro 36 – Máximos de precipitação registados em diversas estações .....	120
Quadro 37 – Caudais de ponta de cheia estimados nas várias bacias para o evento de 18/02/2008 .....	123
Quadro 38 - Aumento dos caudais de ponta de cheia devido à expansão urbana entre 1990 e 2006 .....	123





## INTRODUÇÃO

O interesse pela temática das cheias é algo que resulta, essencialmente, da sua capacidade morfogenética e do seu carácter potencialmente perigoso. Ramos (1994, p. 223) afirma que “as cheias são o mais espectacular dos fenómenos hidrológicos podendo ter, em poucas horas, uma acção morfogenética que a dinâmica fluvial, durante anos, não atinge”. Em Portugal, as cheias foram a catástrofe natural mais mortífera do século XX (Ramos e Reis, 2001).

O conceito de cheia é algo que varia consoante a perspectiva e o objectivo dos autores que escrevem sobre este fenómeno e, por isso, existem diversas definições que podem ser consideradas. Como referem Lencastre e Franco (2006), do ponto de vista estritamente hidrológico, uma situação de cheia sucede quando a precipitação origina escoamento superficial directo e que se traduz na formação de um hidrograma de cheia. Por outro lado, numa perspectiva geográfica, pode dizer-se que “as cheias são fenómenos naturais extremos e temporários, provocados por precipitações excessivas que fazem aumentar o caudal dos cursos de água, originando o extravase do leito menor e a inundação das margens e áreas circunvizinhas” (Zêzere *et al.*, 2005).

Nesse sentido, um determinado território pode estar mais ou menos sujeito a ser afectado pelas cheias (ou por outro fenómeno de origem natural ou antrópica) e, como tal, devem ser avaliados os elementos ligados ao risco (susceptibilidade, perigosidade e vulnerabilidade). No caso concreto das cheias, a susceptibilidade consiste na análise da sua probabilidade espacial de ocorrência numa dada área com base nos factores condicionantes (Zêzere, 2005), enquanto a perigosidade avalia a probabilidade de ocorrência de uma cheia com uma dada magnitude, num determinado período de tempo e numa dada área (Zêzere *et al.*, 2005). Quanto à vulnerabilidade, pode ser definida como o grau de perda de um elemento ou conjunto de elementos vulneráveis, resultante de uma cheia com determinada magnitude

(Zêzere *et al.*, 2005). Depois dos seus elementos, pode ser avaliado o risco. Este resulta essencialmente da combinação entre a perigosidade e a vulnerabilidade dos elementos em risco. No entanto, os custos decorrentes deste tipo de fenómenos (avaliados pelo risco) são extremamente difíceis de serem quantificados, sobretudo os custos indirectos.

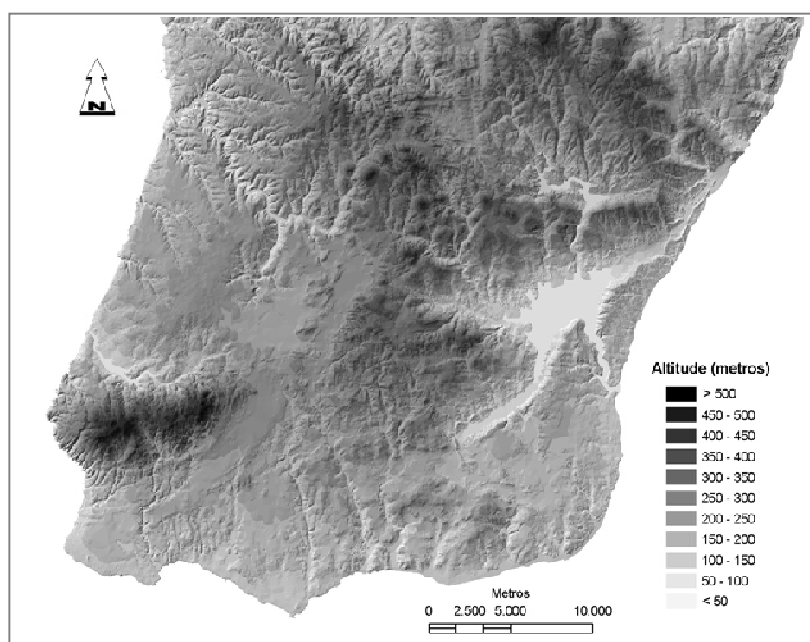
O grau de susceptibilidade das bacias hidrográficas é definido em função das suas componentes permanentes (geometria, substrato geológico, relevo e rede de drenagem) e variáveis (uso do solo). Assim, sabe-se que a susceptibilidade de uma bacia às cheias depende intrinsecamente das suas características naturais, podendo ser aumentada ou reduzida em função da ocupação do solo e de outras intervenções humanas no seu território. O crescimento das áreas urbanas, e a consequente impermeabilização dos solos, faz com que as cheias não sejam apenas um problema, mas um problema cada vez maior (Smith e Ward, 1998). Porém, como reconhecem os mesmos autores, é mais fácil demonstrar qualitativamente que o uso do solo pode afectar o comportamento hidrológico de uma bacia, do que quantificar os seus efeitos.

No estudo das cheias rápidas, para além dos factores condicionantes, importam também os seus factores desencadeantes, pois, por mais propícia à ocorrência destes fenómenos que uma bacia seja, se não ocorrerem precipitações intensas, certamente que não acontecerão cheias. Portanto, as características da precipitação influenciam o carácter das cheias. Uma das formas de avaliar este tipo de fenómeno é através da sua velocidade de progressão e dos caudais de ponta. Assim sendo, as cheias rápidas são particularmente relevantes, porque são mais perigosas do que as cheias progressivas devido ao seu carácter repentino (Ramos, 2009). Deste modo, as cheias rápidas resultam de episódios de precipitação muito intensa e concentrada em poucas horas, e acontecem com maior frequência no Outono (Zêzere *et al.*, 2005). As pequenas bacias hidrográficas situadas na periferia de Lisboa são frequentemente atingidas por este tipo de cheias, sendo a Área Metropolitana de Lisboa (AML) a região do país onde as suas consequências foram mais devastadoras durante os últimos 50 anos. Relembre-se as cheias de 1967, de 1983 e, mais recentemente, de 2008, cujas consequências humanas e materiais foram enormes, com particular destaque para o primeiro destes eventos.

Como as cheias ocorrem nos fundos de vale, é importante saber de que forma se utilizam os leitos de cheia e se se cumpre a legislação vigente. A vulnerabilidade a estes fenómenos depende directamente da forma como se ocupam estes espaços e em 1967 provou-se que as periferias de Lisboa eram, na altura, áreas muito vulneráveis a estes acontecimentos,

essencialmente devido à presença de inúmeros bairros de génese ilegal instalados nos leitos de cheia.

A AML Norte é um território que, tendo em conta a realidade portuguesa, se pode considerar de relevo moderado (figura 1), estando o seu ponto mais alto localizado na serra de Sintra (Pena – 528 metros) (Ramos-Pereira, 2003). Segundo a mesma autora, a Península de Lisboa tem três áreas com características distintas em termos de relevo: o maciço Sintra, as plataformas litorais e os relevos de costeira. A serra Sintra é um doma isolado e de forma elíptica, composto por rochas magmáticas (granitos, sienitos, gabros e dioritos), e que é também caracterizado pela sua dissimetria, pois as suas vertentes são mais suaves a Sul do que a Norte (Ramos-Pereira, 2003). As plataformas litorais de São João das Lampas, de Fontanelas (situadas a Norte da serra de Sintra) e de Cascais (localizada a Sul do maciço) são áreas planas entalhadas pela rede hidrográfica e constituídas por rochas sedimentares (Ramos-Pereira, 2003). Quanto ao relevo de costeira, domina a área a Norte de Lisboa, destacando-se dois grandes alinhamentos: Lousa-Bucelas e Odivelas-Vialonga (Zêzere, 1991). A sua estrutura monoclinal possui uma inclinação moderada (12°) para Sul e Sudeste, verificando-se uma alternância de rochas de diferente dureza, permeabilidade e plasticidade, como arenitos, margas ou calcários (Zêzere, 1991; Reis *et al.*, 2003; Ferreira A.B., 2005). Para além destas áreas, existem ainda os locais deprimidos, que podem ter diferentes origens. São exemplos as depressões ou várzeas de Loures e de Colares.



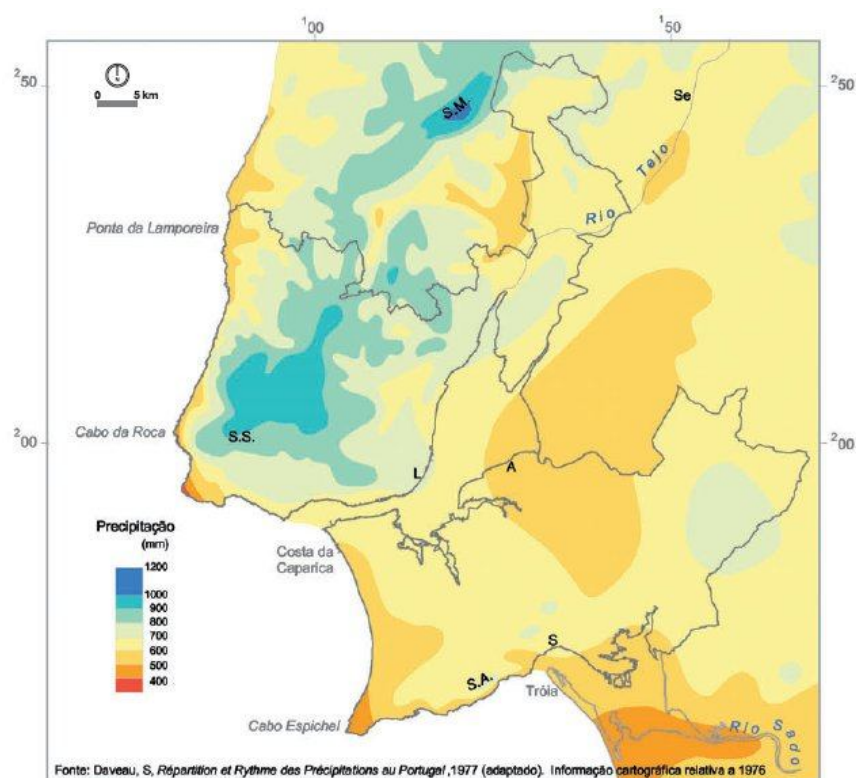
**Figura 1** – Relevo da AML Norte



Como se percebe, a AML Norte apresenta uma grande diversidade litológica, uma vez que, aos terrenos sedimentares da Orla Mesocenozóica Ocidental e da Bacia Cenozóica do Tejo, se juntam, fruto da sua evolução geológica, as rochas magmáticas do maciço de Sintra e rochas metamórficas envolventes e, ainda, do Complexo Vulcânico de Lisboa (Ramos-Pereira, 2003). A nível geológico, encontram-se, nesta região, formações do Jurássico, Cretácico, Paleogénico, Neogénico e Quaternário.

No que diz respeito à precipitação, pode dizer-se que esta é uma região de contrastes significativos a nível dos valores anuais, pois, em alguns locais, a precipitação média atinge os 1000 mm, enquanto noutros chega a ser inferior a 600 mm (figura 2). Os valores mais elevados registam-se na serra de Sintra e no interior da Península de Lisboa, e os mais baixos observam-se junto ao litoral (figura 2). Este facto realça a importância decisiva do relevo/altitude na distribuição das chuvas anuais (Ferreira D.B., 2005).

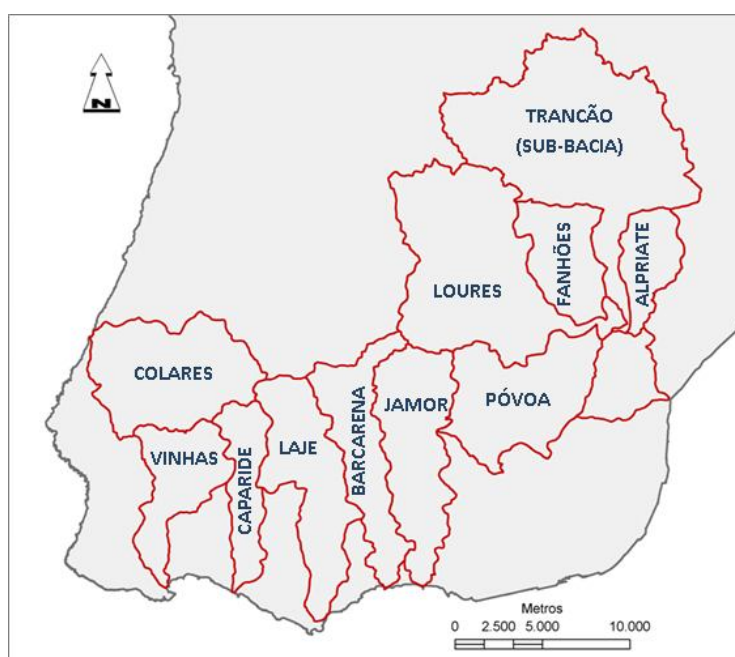
Relativamente ao uso do solo, esta é uma região que, na primeira metade do século XX, apresentava ainda características rurais, com excepção da cidade de Lisboa. A partir dos anos 60 a situação começou a modificar-se e, na AML Norte, assistiu-se a um crescimento exponencial do processo de urbanização, essencialmente ao longo dos eixos ferroviários de Cascais, Sintra e Vila Franca de Xira (Costa, 2004; Barbosa, 2005). Actualmente, a tendência de expansão das áreas urbanas mantém-se.



**Figura 2** – Precipitação média anual: 1931/1960 (in Ramos-Pereira, 2003: p.60)

As bacias hidrográficas que drenam a AML Norte são todas de pequena dimensão e apresentam características relativamente distintas entre si (analisadas no capítulo II). Todavia, o seu regime hidrológico é algo que não varia. Apresentam um regime pluvial subtropical, marcado por uma grande irregularidade e pela estiagem severa no mínimo durante os três meses de Verão (Ramos, 2005a; Ramos, 2005b). A questão da irregularidade fluvial explica-se pela irregularidade do regime da precipitação ao longo do ano (típica do clima mediterrâneo) (Ramos e Reis, 2001; Ramos, 2005a). A estiagem depende da diminuição drástica da precipitação na estação quente, mas pode ser exacerbada pelo fraco escoamento de base das bacias. Os cursos de água que drenam a Península de Lisboa são, no geral, sazonais ou intermitentes, porém, nalguns troços, apresentam escoamento permanente devido a nascentes ou ao efeito da maré (troços jusante). Por outro lado, como afirma Coutinho (1984), as pequenas bacias portuguesas (como as da AML Norte) caracterizam-se também por apresentarem um regime torrencial, dado que respondem muito rapidamente à precipitação, o que as torna perigosas em caso de ocorrência de chuvas intensas.

Neste estudo são consideradas 12 bacias hidrográficas, localizadas em diferentes contextos, onde as cheias acontecem com alguma frequência. Assim sendo, são estudadas as seguintes bacias: Colares, Vinhas, Caparide, Laje, Barcarena, Jamor, Trancão (bacia), Trancão (sub-bacia), Póvoa, Loures, Fanhões e Alpriate (figura 3). Como se compreende, estas bacias têm formas e dimensões diversas, estão inseridas em áreas com características de relevo distintas e são talhadas em litologias diferentes.



**Figura 3** – Bacias hidrográficas estudadas

A bacia da ribeira de Colares, é a única que drena para Oeste, indo o seu curso de água principal desaguar no Oceano Atlântico. É uma bacia com grandes contrastes de relevo e de litologia entre as duas margens, já que a sua margem esquerda corresponde à vertente Norte da serra de Sintra e a sua margem direita está instalada em terrenos de plataforma litoral.

Vinhas, Caparide, Laje, Barcarena e Jamor são bacias alongadas que drenam para Sul em direcção ao rio Tejo ou ao Oceano Atlântico. Localizadas ao longo da costa do Estoril, possuem características algo distintas entre si. Por um lado, Vinhas e Caparide ainda são influenciadas pela presença do maciço de Sintra, uma vez que os seus sectores montantes integram a vertente Sul desta serra, o que se reflecte no relevo e na litologia destas duas bacias. Por outro, Barcarena e Jamor já estão mais próximas de uma outra realidade, nomeadamente em termos litológicos, já que são, em parte, constituídas por terrenos do Complexo Vulcânico de Lisboa. Quanto a Laje, está localizada numa área de transição, sendo formada predominantemente por rochas sedimentares. Estas últimas três bacias apresentam desníveis altitudinais menos acentuados se comparados com os de Vinhas e de Caparide.

A bacia do rio Trancão é significativamente maior do que as restantes, integrando um conjunto de áreas com características diferenciadas. A bacia principal foi dividida em sub-bacias (Trancão (sub-bacia), Póvoa, Loures, Fanhões e Alpriate) (figura 3). No entanto, a bacia do Trancão como um todo não deixa de ser considerada neste trabalho. Este território é marcado por uma grande diversidade litológica, numa estrutura monoclinal, que, aliás, condicionou a instalação da rede hidrográfica. Isso é perfeitamente visível, por exemplo, na bacia da ribeira da Póvoa, onde o curso de água principal é ortoclinal e o seu principal afluente, a ribeira de Odivelas, tem uma direcção cataclinal até atingir a base da frente da costeira (Duarte *et al.*, 2005). Na bacia do Trancão destaca-se também a depressão de Loures, uma área de baixa altitude e de fundo plano que se desenvolve entre as costeiras de Odivelas-Vialonga, a Sul, e a de Lousa-Bucelas, a Norte. Esta depressão ortoclinal está colmatada por uma grande quantidade de sedimentos provenientes das sub-bacias do Trancão, pois todas elas têm o seu sector terminal precisamente nesta área. A bacia do Trancão é constituída por formações geológicas de idades muito diferentes, que vão desde o Jurássico, no sector montante, até ao Quaternário. É formada essencialmente por rochas sedimentares, existindo também uma área importante composta pelos terrenos do Complexo Vulcânico de Lisboa na área envolvente à várzea de Loures.

Dependendo da sua localização dentro da AML Norte, as bacias hidrográficas possuem usos do solo dominantes. Desta forma, as que se localizam mais próximas da cidade de Lisboa e ao longo dos eixos ferroviários já referidos têm os processos de urbanização mais

avancados (Póvoa, Alpriate, Jamor, Barcarena, Laje e Caparide). Quanto às restantes, têm um carácter mais rural (agrícola ou florestal).

Esta dissertação procura colmatar uma lacuna verificada nos estudos de hidrologia efectuados na Área Metropolitana de Lisboa. De facto, para esta região não existe um estudo comparativo entre bacias hidrográficas no que diz respeito à susceptibilidade às cheias rápidas. Para a AML existem vários estudos sobre determinadas bacias, mas são, sobretudo, estudos de caso em que se analisam os factores físicos e/ou variáveis de uma única bacia. Por isso, surgiu a necessidade de efectuar uma comparação entre as bacias da AML Norte para se conhecer quais são as mais e as menos susceptíveis às cheias. Para isso, fazem-se dois tipos de avaliação: 1) susceptibilidade natural, resultante da análise das componentes permanentes das bacias (geometria, substrato geológico, relevo e rede de drenagem); 2) susceptibilidade antrópica, que resulta apenas da análise do uso do solo. Posteriormente, estas duas avaliações são cruzadas para se obter a susceptibilidade final das bacias da AML Norte às cheias.

Outro dos objectivos passa por avaliar os impactes da evolução do uso do solo no comportamento hidrológico destas 12 bacias hidrográficas, nomeadamente nos caudais de ponta de cheia e nos tempos de concentração.

Aumentando a escala de análise, interessa conhecer também de que forma estão ocupados os leitos de cheia das bacias estudadas e como se processou a sua evolução nos últimos anos.

Procura-se igualmente fazer uma análise dos factores desencadeantes das cheias. Aliás, a análise das precipitações assume uma importância acrescida neste trabalho, uma vez que a quase inexistência de dados hidrométricos não permite examinar os caudais. Não podendo estimar os períodos de retorno dos caudais, opta-se por avaliar a recorrência das precipitações abundantes em vários pontos da AML Norte. Isto é, pode não se saber exactamente quais foram os caudais atingidos durante as cheias de maior magnitude, mas pode conhecer-se a intensidade das precipitações que as originaram e os respectivos períodos de retorno.

Por último, analisam-se as cheias propriamente ditas. Recorrendo ao estudo de Quaresma (2008), tenta-se perceber qual foi a distribuição espacial e temporal dos eventos danosos referidos nos jornais. Procura-se também sintetizar a informação existente sobre as cheias de 1967 e de 1983, assim como, analisar detalhadamente a precipitação que deu origem às cheias de 2008, contribuindo para um melhor conhecimento deste fenómeno.



## **CAPÍTULO I**

### **ENQUADRAMENTO TEÓRICO E METODOLÓGICO**

#### **1. ESTADO DA ARTE**

As cheias são fenómenos hidrológicos extremos que, nas pequenas bacias hidrográficas portuguesas, dependem muito das precipitações intensas. Como tal, quando se pretende estudar as cheias é importante analisar as precipitações que lhes dão origem, especialmente se não existirem dados hidrométricos. Todavia, e apesar de estarem interligadas, as análises podem ser independentes. Ou seja, existem determinados tipos de estudos sobre cheias que não abordam os factores desencadeantes, tal como há estudos que pretendem investigar apenas as precipitações intensas.

Fragoso (2003) realizou um dos trabalhos de referência neste âmbito ao analisar as precipitações intensas no Sul de Portugal. Para poder representar espacialmente o fenómeno das chuvas intensas recorreu aos valores das precipitações máximas diárias, do 9º decil e do quartil superior. Fragoso (2003) estimou igualmente as precipitações máximas diárias para os períodos de retorno de 50 e 100 anos, utilizando os dados de 113 estações meteorológicas que tivessem um mínimo de 30 anos de registos. Para calcular os períodos de retorno utilizou a lei de Gumbel. Genericamente, todos estes parâmetros confirmaram que é no Algarve que os valores estimados são mais elevados, nomeadamente no Sotavento e na serra de Monchique. Verificou igualmente que as precipitações mais intensas tendem a ocorrer essencialmente entre Outubro e Janeiro. Quando se estudam as precipitações intensas, é importante definir-se o valor a partir do qual este elemento climático pode originar eventos hidrológicos extremos. Para isso, Fragoso (2003) elaborou um espectro de abundância diária das precipitações, que permitiu comparar os registos de 98 estações entre 1983/84 e 1997/98. Este autor procurou então encontrar um valor de precipitação diária que fosse relativamente elevado e que,

simultaneamente, tivesse sido atingido na generalidade das estações. Foram definidos 40 mm diários como valor representativo de precipitações abundantes no Sul de Portugal. Por outro lado, Fragoso (2003) considerou 100 mm/dia como representativo de precipitações muito abundantes. Este valor foi escolhido por ser muito utilizado em inventários relativos a episódios de precipitação intensa, apesar de ser um limite arbitrário. Depois de definidos estes limiares, foi possível elaborar inventários com os eventos de precipitação abundante e muito abundante, analisando a sua distribuição temporal e espacial. Esta análise confirmou os resultados referidos atrás, isto é, estes fenómenos ocorrem sobretudo no Outono e no início do Inverno, afectando maioritariamente a região do Algarve. Por último, este autor estudou ainda com maior detalhe alguns episódios de precipitações torrenciais ocorridos no Sul de Portugal.

Na avaliação dos períodos de retorno também Portela *et al.* (2000) e Rodrigues (2009), nos seus estudos sobre as cheias no rio Maior e no rio Vouga respectivamente, utilizaram a lei de Gumbel para avaliar as precipitações diárias máximas anuais das estações meteorológicas de Santa Catarina (bacia do rio Maior) e de São Pedro do Sul (bacia do rio Vouga).

Outro dos estudos de referência é o de Brandão (1995), que procurou caracterizar os fenómenos pluviosos intensos, na perspectiva de estimar as intensidades dos eventos de precipitação para dadas durações e períodos de retorno. Primeiramente, determinou seis curvas de possibilidade udométrica ou curvas IDF (intensidade-duração-frequência) através da digitalização dos udiogramas de 4 postos localizados em Aveiro, Lisboa, Évora e Faro. Foram consideradas as durações de 5, 10, 15 e 30 minutos e de 1, 2, 6 e 12 horas; e os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos. Das seis funções de distribuição analisadas, é a de Gumbel que melhor exprime, para uma dada duração, a relação entre a intensidade de precipitação e o período de retorno. Esta autora verificou então que, com a mesma duração e o mesmo período de retorno, os eventos de precipitação têm uma maior magnitude em Faro. Seguem-se Lisboa e Évora, com valores semelhantes, e, por fim, Aveiro. Para além disto, Brandão (1995) determinou as curvas de distribuição temporal. Através do programa RSIFM foram elaborados inventários mensais dos eventos de precipitação, que permitiram compreender a sua distribuição ao longo do ano nas 4 estações meteorológicas. Foram considerados como acontecimentos pluviosos intensos os que apresentaram valores totais acima de 25,4 mm ou valores médios acima de 5 mm/h. Também foram estudadas as situações sinópticas que deram origem a episódios chuvosos cuja intensidade foi superior a 50,8 mm (o dobro do valor mínimo considerado – 25,4 mm).

Com este trabalho passaram-se a obter “valores de precipitações mais correctos para durações horárias e sub-horárias, uma vez que, até aí, eram muitas vezes determinados a partir

da análise dos registos dos dias de maior precipitação” (Brandão *et al.*, 2001; p. 5). No entanto, surgiu a necessidade de fazer uma maior generalização espacial deste tipo de estimativas, alargando-as igualmente a períodos de retorno superiores. Deste modo, Brandão e Rodrigues (1998) calcularam curvas IDF para 17 estações meteorológicas de todo o país, que permitem avaliar a intensidade da precipitação para os períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos. No entanto, os autores referem que, na altura, ainda não existia informação udográfica digitalizada de um número suficiente de postos que permitisse determinar uma regionalização das curvas IDF. Portanto, a informação desenvolvida neste estudo permitiu apenas adaptar os mapas de zonamento para 100 anos propostos por Godinho (1989)<sup>1</sup>. Assim, elaboraram-se mapas com a percentagem dos máximos de precipitação em 1 e 6 horas, em função dos totais diários para o período de retorno de 1000 anos.

O trabalho de Brandão *et al.* (2001) surgiu no seguimento dos dois anteriores e baseou-se na análise das séries de 27 estações meteorológicas de todo o país. Mais uma vez, as séries de dados foram obtidas através da digitalização dos udogramas diários. Para estas estações foram determinadas: curvas PMP (Precipitações Máximas Prováveis em função da duração), curvas IDF, relações de proporcionalidade entre precipitações acumuladas em diferentes intervalos de tempo, curvas PAD (Precipitação-Área-Duração) e hietogramas de projecto. As curvas IDF confirmaram uma das relações enunciadas em Brandão (1995): em termos gerais, a magnitude das precipitações é superior no Sul relativamente ao resto do país. Porém, os valores mais elevados das curvas PMP foram obtidos para as estações das Penhas Douradas, São Julião do Tojal, Relíquias (Baixo Alentejo), Monchique e Faro (Aeroporto), o que faz pensar que, em algumas delas, os valores registados ainda estão longe do possível máximo de precipitação (indicado pelas curvas PMP).

Também no sentido de estimar os valores máximos de precipitação para Portugal Continental, Correia *et al.* (2010) estabeleceram um método de cálculo para diversas durações e períodos de retorno. Basicamente, este método possibilita o cálculo da precipitação máxima para qualquer local do país e para qualquer duração e período de retorno. Pode ser obtido através da fórmula seguinte:

---

<sup>1</sup> Godinho S (1989) *Valores Máximos de Quantidade de Precipitação. Estimativa dos Valores Relativos a Durações Inferiores a 24 Horas (II)*. Nota Técnica de Meteorologia e Geofísica nº 10, INMG, Lisboa.



$$P_m = a \times (t/24)^b \times c$$

$P_m$  = precipitação máxima (mm);  $t$  = duração (horas);  $a$  e  $b$  são parâmetros determinados em função do local do país<sup>2</sup>;  $c$  também é um parâmetro local, mas que tem de ser definido através de um parâmetro adicional:

$$c = c_1 + \frac{1 - c_1}{2,303} \times \ln(T)$$

$c$  = parâmetro local;  $c_1$  = parâmetro adicional<sup>3</sup>;  $\ln$  = logaritmo natural;  $T$  = período de retorno (anos)

As precipitações intensas podem ou não gerar cheias, dependendo da conjugação de uma série condições. Existem diversos trabalhos que abordam a temática das cheias numa determinada região ou bacia, estudando com maior ou menor pormenor um ou mais eventos.

Marchi *et al.* (2010) recolheram informação de 25 cheias rápidas ocorridas na Europa entre 1994 e 2008. O seu principal objectivo passou por identificar eventos de elevada magnitude que fossem representativos de diversas regiões hidroclimáticas europeias. Dada a inexistência de dados hidrométricos em alguns locais, o critério adoptado para a escolha dos eventos foi o período de retorno das precipitações. Desta forma, só foram escolhidos os eventos cujo período de recorrência da precipitação desencadeante fosse superior a 50 anos. Os resultados da investigação revelaram, em primeiro lugar, que os eventos na região mediterrânea e alpino-mediterrânea (Catalunha, ilha de Creta, França, Itália e Eslovénia) ocorrem sobretudo no Outono, ao contrário dos que se verificam nas regiões de clima temperado continental (Áustria, Roménia e Eslováquia), que sucedem maioritariamente no Verão. Verificou-se igualmente que as cheias rápidas da região mediterrânea têm, regra geral, maiores durações, maiores magnitudes e abrangem áreas mais extensas do que as observadas no interior da Europa.

Aumentando a escala de análise, Quaresma (2008), num estudo com objectivos bastante diferentes, construiu um inventário de eventos hidro-geomorfológicos (cheias e movimentos de vertente) com carácter danoso que aconteceram em Portugal Continental entre 1900 e 2006. A construção desta base de dados foi conseguida através da consulta de jornais referentes ao período em causa. Para cada evento foi recolhida: data da ocorrência; tipo de evento; localização; número de mortos, feridos, desaparecidos, evacuados e desalojados;

<sup>2</sup> Os valores destes parâmetros podem ser consultados nos mapas apresentados em Correia *et al.* (2010).

<sup>3</sup> O valor deste parâmetro pode ser consultado no mapa apresentado em Correia *et al.* (2010).

prejuízos materiais; e entidades envolvidas. Uma tarefa semelhante foi desenvolvida por Rodrigues (2009), mas unicamente para as cheias e inundações que afectaram as Termas de São Pedro Sul. O seu trabalho consistiu na observação de jornais daquela região para o período que decorreu entre 1960 e 2001. Alguns dos eventos de maior magnitude foram desenvolvidos em maior pormenor. Também Lavrador-Silva (2002) usou um jornal local para identificar as datas das cheias que afectaram a área de Sintra/Colares até ao final do ano de 1999, encontrando notícias para 5 eventos (com consequências distintas). Para essas cheias foram analisadas, genericamente, as situações sinópticas que lhes deram origem, utilizando igualmente os dados de precipitação de 5 estações meteorológicas.

Numa outra perspectiva, Ramos (1994) e Ramos e Reis (2001) caracterizaram o comportamento hidrológico de uma grande bacia hidrográfica (rio Tejo) e de outras com dimensões significativamente inferiores. Ramos (1994) estudou as cheias nas bacias da ribeira de Tera, situada no Alto Alentejo, e do rio Maior, situada na Estremadura. Para estimar o caudal mínimo de cheia destes dois cursos de água, num determinado ponto do seu percurso, esta autora recorreu a observações de campo que foram, posteriormente, comparadas com os caudais diários obtidos a partir dos registos das alturas de água. Nas duas bacias a distribuição das cheias ao longo do ano é semelhante, uma vez que, a maioria dos eventos sucedem entre Dezembro e Março.

Ramos e Reis (2001) analisaram as cheias numa pequena bacia do Sul de Portugal (bacia da ribeira de Cobres), cuja área definida pela estação hidrométrica de Monte da Ponte é de 706 km<sup>2</sup>. Estes fenómenos extremos ocorrem em maior número em Dezembro, no mês em se que registam maiores valores de precipitação e de caudal. Relativamente ao caudal mínimo de cheia, foi calculado através da obtenção do 9º decil do mês de maior escoamento (Dezembro).

No território português são frequentes as cheias rápidas, sendo que algumas delas foram particularmente gravosas, tendo em conta as características da precipitação desencadeante e das bacias hidrográficas afectadas. Na segunda metade do século XX, as cheias mais destruidoras ocorreram em Novembro de 1967, em Novembro de 1983, em Outubro/Novembro de 1997 e em Fevereiro de 2008. Todas elas tiveram maiores consequências na região de Lisboa e/ou no Sul do país, sendo objecto de estudo de alguns artigos apresentados seguidamente. Porém, como as estações hidrométricas são em menor número e têm uma menor quantidade de dados comparativamente às estações meteorológicas,

os estudos sobre as cheias baseiam-se, com alguma frequência, na análise das precipitações que as desencadeiam.

As cheias de 1967 foram as mais catastróficas de todas, e são encaradas como algo que ficou marcado na história dos últimos 50 anos em Portugal, essencialmente pelo número de mortes contabilizadas (cerca de 700, segundo Ramos e Reis, 2001). Este desastre natural revelou a enorme vulnerabilidade da área suburbana de Lisboa, o que contribuiu para algumas mudanças na legislação e nos hábitos. O evento de 1967 constitui igualmente uma referência para quem estuda as cheias, sobretudo na área de Lisboa. Amaral (1968) retratou os seus efeitos, analisando os registos de precipitação de algumas estações localizadas na AML Norte e as condições das bacias hidrográficas que acabaram por agravar as suas consequências.

Passados 16 anos ocorreu novo episódio chuvoso de elevada magnitude, felizmente sem o mesmo resultado em termos pessoais e materiais. Trabalhos como o de Costa (1986) e de Roxo e Ventura (1986) efectuaram análises comparativas entre os dois eventos (1967 e 1983), equiparando as características das precipitações, as condições naturais das bacias e a ocupação do território nas duas datas. Também Ramos e Reis (2001) abordaram estes dois fenómenos, tal como Coutinho (1984) que centrou a sua análise unicamente na cidade de Cascais e na ribeira das Vinhas.

O início do ano hidrológico de 1997/1998 ficou igualmente marcado por uma série de episódios de precipitação intensa praticamente consecutivos, originando cheias não só nas pequenas bacias hidrográficas, mas também em bacias como a do Tejo ou do Guadiana. Rodrigues *et al.* (1998) analisaram as precipitações que originaram as cheias em vários locais do país (AML, Alentejo, Algarve e Águeda), detectando os respectivos períodos de retorno, assim como as cotas e caudais que atingiram alguns cursos de água. Ramos e Reis (2001) também abordaram algumas dessas cheias, referindo as situações sinópticas associadas. As estimativas de Rodrigues *et al.* (1998) apontaram, algumas vezes, para períodos de retorno pluricentenários, correspondendo a precipitação verificada em Monchique no dia 26 de Outubro a um período de retorno na ordem dos 1000 anos.

Por último, em Fevereiro de 2008 abateram-se sobre a Área Metropolitana de Lisboa chuvas intensas que deram origem a cheias nas suas pequenas bacias hidrográficas. Rebelo (2008) estabeleceu algumas comparações entre estas cheias e as de 1967 e de 1983, mas foram os trabalhos de Moreira *et al.* (2008) e de Fragoso *et al.* (2010) que acrescentaram mais informação ao conhecimento deste fenómeno, essencialmente no que diz respeito às características das precipitações e aos respectivos períodos de retorno. As chuvas foram

espacialmente concentradas na cidade de Lisboa e nos seus arredores mais próximos, atingindo períodos de retorno superiores a 150 e a 200 anos em alguns desses locais.

Num estudo sobre cheias, para além de se caracterizar os fenómenos desencadeantes e as próprias cheias daí decorrentes, interessa igualmente avaliar a forma como as bacias hidrográficas respondem às precipitações intensas. Essa resposta é condicionada tanto pelos factores naturais, como pelos factores humanos.

Por todo o mundo são feitos estudos sobre as características físicas das bacias hidrográficas. Por um lado, alguns estudos procuram explicar as relações entre os factores permanentes das bacias e o comportamento hidrológico, como acontece em Patton (1988), Lencastre e Franco (2006) e NOAA (2010). Por outro, existem os estudos de caso, que analisam as especificidades de uma ou mais bacias de drenagem e que podem ser efectuados em diversas condições hidroclimáticas. A influência dos factores permanentes (geometria, relevo, rede de drenagem, substrato geológico e solos) na amplificação ou na atenuação dos efeitos da precipitação é conhecida e aceite pela maioria dos autores. Genericamente, as cheias são agravadas em bacias circulares, bem drenadas, com declives acentuados e de baixa permeabilidade. De modo a quantificar as características físicas é utilizado um conjunto de indicadores adimensionais que permite comparar bacias com áreas muito diferentes. Horton fez os primeiros estudos quantitativos sobre as bacias hidrográficas, cujo objectivo passou por reduzir a complexidade dos fenómenos hidrológicos (Horton, 1932; *in* Patton, 1988).

Actualmente, estes indicadores não variam muito de autor para autor, pois, normalmente, são utilizados quase sempre os mesmos. Assim, para a componente geometria os índices mais utilizados são: factor forma, índice de Gravelius, índice de circularidade e índice de alongamento. Para a rede de drenagem são frequentemente calculados: hierarquia, magnitude, densidade de drenagem, densidade hídrica, relação de bifurcação, coeficiente de manutenção e coeficiente de torrencialidade. E para o relevo os mais comuns são: amplitude altimétrica, altitude média, altura média, coeficiente orográfico, índice de rugosidade, relação de relevo, índice de declive de Roche e inclinação do curso de água principal.

Para além da geometria, rede de drenagem e relevo, há ainda que considerar o substrato geológico e os solos. Contudo, e ao contrário das outras três componentes, não existem propriamente índices que avaliem a permeabilidade das formações geológicas ou dos solos. Por isso, essa avaliação é feita, geralmente, de uma forma qualitativa ou recorrendo a um parâmetro dos métodos de cálculo dos caudais de ponta de cheia (explicados mais à frente). Porém, existem outras formas de avaliar a permeabilidade de uma bacia hidrográfica.

Ramos (1994) criou classes de permeabilidade em função dos conjuntos litológicos existentes nas bacias e do respectivo comportamento hidrológico. Teve também em conta neste procedimento a localização das nascentes e os diferentes litofácies presentes, assim como a sua influência na densidade de drenagem. Uma metodologia também de carácter hidrogeológico foi definida por Ramos *et al.* (2010) para a área de Lisboa e Vale do Tejo. Os autores estabeleceram uma classificação de permeabilidade baseada no conhecimento empírico das características das litologias associadas a cada mancha geológica. Esta classificação varia de 0 a 10, sendo que o valor 0 corresponde às áreas aquáticas ou às áreas impermeabilizadas, o valor 1 às áreas de permeabilidade muito baixa e o valor 10 às áreas com permeabilidades muito elevadas.

De seguida faz-se referência a alguns estudos estrangeiros e portugueses que aplicam os índices já referidos, de modo a avaliar os factores permanentes de uma ou mais bacias hidrográficas.

Christofolletti (1986) não o fez para nenhuma bacia em particular, pois procurou fazer uma síntese dos muitos índices de relevo existentes e que podem ser calculados para qualquer bacia hidrográfica. Ao todo, neste estudo estão listados 26 índices de relevo.

Perucca e Angileri (2010) procuraram avaliar o problema das cheias rápidas na bacia hidrográfica do rio del Molle (Argentina). Esta bacia tem uma área de 415,94 km<sup>2</sup>, estando o seu sector montante localizado na região montanhosa da Cordilheira Frontal (Andes). Apresenta um clima árido/semi-árido e, por isso, os seus cursos de água são considerados ocasionais. No entanto, entre Dezembro e Março são frequentes as precipitações intensas e de curta duração que originam cheias rápidas, que afectam a cidade de Malimán de Arriba. A bacia principal foi dividida em 4 sub-bacias, sendo calculados vários dos índices indicados acima.

Eze e Efiang (2010) tentaram compreender a influência dos factores físicos no comportamento hidrológico da bacia do rio Calabar (Nigéria). Esta bacia possui uma área de 1514 km<sup>2</sup> e está situada numa área húmida do continente africano (precipitação média anual de 1830 mm). Apesar de as cheias acontecerem com alguma frequência, os resultados dos parâmetros calculados não sugerem uma elevada susceptibilidade desta bacia relativamente a este fenómeno.

Ramos (1994) teve como objectivo fazer uma caracterização das bacias da ribeira de Tera (626,1 km<sup>2</sup>) e do rio Maior (706,4 km<sup>2</sup>) do ponto de vista dos factores permanentes, relacionando-os com o comportamento hidrológico de cada uma delas. São bacias com

características distintas, o que se reflecte nos respectivos comportamentos hidrológicos, mas ambas possuem características capazes de amplificar os caudais de ponta de cheia.

Rodrigues (2009) pretendeu estudar o comportamento hidrológico da bacia do rio Vouga, avaliando a tendência que esta demonstra para a ocorrência de cheias. Esta é uma bacia com uma área de 3645 km<sup>2</sup>, localizada entre as bacias do Douro (a Norte) e do Mondego (a Sul). Face às características da bacia, esta autora optou por subdividi-la em duas: uma mais reduzida, alongada, dissimétrica e acidentada até S. Pedro do Sul; e outra, a partir dessa cidade, de maior dimensão, mais arredondada e de relevo mais suave.

Os estudos já efectuados sobre as bacias que integram esta dissertação são apresentados de seguida.

O trabalho de Reis (1996) tem como área de estudo a bacia da ribeira de Colares. O autor pretendeu fazer a análise morfológica da bacia e das suas sub-bacias. O aspecto que mais se destaca relativamente às características da bacia de Colares é a forte dissimetria entre as duas margens. De facto, as duas margens correspondem a duas realidades completamente diferentes, pois as sub-bacias que compõem a margem esquerda apresentam uma susceptibilidade às cheias e à erosão hídrica muito superior às da margem direita. Isto deve-se essencialmente às características do relevo e da rede de drenagem (e também da permeabilidade da zona vadosa, que não foi analisada neste estudo). O autor refere ainda que, em termos de ordenamento do território, deverá proceder-se ao estudo das duas margens separadamente.

Igualmente para a bacia da ribeira de Colares, Lavrador-Silva (2002) acabou por tirar partido da análise feita por Reis (1996), completando-a com a identificação de pontos/troços de maior perigosidade às cheias e com a avaliação da permeabilidade do substrato geológico. Assim sendo, o troço mais perigoso relativamente às cheias está situado entre a confluência da ribeira de Almarge e a foz. Os pontos críticos localizam-se na desembocadura da ribeira de Almarge e na confluência da ribeira de Nafarros-Mucifal com o colector principal. Quanto à questão do substrato geológico, foi definida a perigosidade litológica face às cheias. Nesse sentido, são as rochas eruptivas (granitos e sienitos) as que apresentam um maior grau de perigosidade dada a sua reduzida permeabilidade, e são as formações não consolidadas (ex: dunas) as que possuem uma perigosidade mais baixa em função da sua elevada permeabilidade.

Pereira e Ventura (2004) fazem uma pequena análise das componentes físicas da bacia do rio Trancão, embora esta tenha apenas um carácter descritivo, não utilizando, neste âmbito, qualquer metodologia. Todavia, consideram que esta bacia, assim como as suas sub-bacias,

têm características que agravam o problema das cheias. Destacam a questão das inundações na várzea de Loures, cuja natureza e localização a tornam propensa à acumulação da água, dificultando o seu escoamento.

Duarte *et al.* (2005), no seu estudo sobre parte da bacia da ribeira de Odivelas/Póvoa (25,33 km<sup>2</sup>), procuraram definir os factores de risco de cheia. De referir que o ponto jusante considerado para delimitar a bacia situa-se depois da confluência da ribeira de Odivelas com o rio da Costa. Estes autores concluíram que esta é uma bacia muito favorável à ocorrência de cheias rápidas devido às suas componentes permanentes, sendo, apesar de tudo, o relevo a menos importante das componentes no que se refere ao desenvolvimento das cheias. Quanto à definição da perigosidade da bacia relativamente a estes fenómenos, as áreas de leito de cheia foram classificadas tendo em conta a probabilidade de serem inundadas, sendo-lhes atribuído um valor a cada classe: valor 1 para as áreas de perigosidade baixa (em concordância com as aluviões e ocupadas pela cheia máxima provável); valor 2 para os locais de perigosidade média (inundadas uma a duas vezes nos últimos 50 anos); e valor 3 para as áreas de perigosidade elevada (áreas de inundação frequente, por serem as mais deprimidas e de confluência de colectores principais).

Tal como acontece com os factores permanentes, também para os factores variáveis existem estudos enquadrados numa lógica causa-efeito, meramente teóricos, e estudos de caso, analisados mais detalhadamente a seguir.

A análise do uso do solo numa bacia hidrográfica pode ser analisada consoante o objectivo de cada autor. Nesta óptica, pode dizer-se que existem três tipos de estudos: 1) os que analisam apenas a ocupação do território numa determinada data, de modo a fazer uma caracterização da bacia nesse aspecto; 2) os que analisam a evolução entre duas ou mais datas; 3) os que fazem a análise dessa evolução e dos seus impactes no regime hidrológico das bacias. A informação relativa à ocupação do solo é frequentemente obtida através de imagens de satélite, fotografias aéreas ou de mapas de uso do solo (Corine Land Cover ou cartas agrícolas e florestais).

Quando se examina esta componente apenas numa data, o objectivo passa, normalmente, por fazer um enquadramento de uma ou mais bacias. Os estudos que comparam datas diferentes, para compreender a evolução verificada, introduzem um efeito dinâmico nessa análise. Dois exemplos de estudos em que se aborda a evolução da ocupação do território são os de Saraiva *et al.* (1998) e de Lavrador-Silva (2002). Saraiva *et al.* (1998) tentaram perceber a evolução da urbanização na bacia da ribeira da Laje ao longo do tempo.

Para isso, recorreram aos dados apurados num estudo anterior<sup>4</sup> para os anos de 1965 e 1984, e utilizaram a fotografia aérea de 1994 à escala 1:10 000 da Base Aérea nº1 (Sintra). Estes autores apuraram que houve uma grande expansão das áreas urbanizadas nos sectores montante e jusante da bacia, sobretudo entre 1984 e 1994. Lavrador-Silva (2002), no seu estudo sobre a bacia da ribeira de Colares, utilizou as cartas agrícolas e florestais de 1969 e de 1991, definindo 4 classes de uso do solo: agrícola, florestal, urbana e de incultos. Em termos gerais, entre essas duas datas, assistiu-se à diminuição das áreas agrícolas e ao aumento das áreas florestais e urbanas. Essencialmente, esta bacia perdeu o seu carácter agrícola e passou a deter um cariz mais florestal.

Sabe-se que a impermeabilização antrópica dos solos tem consequências no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas. Os principais efeitos do aumento das áreas urbanas são conhecidos: aumento da magnitude dos picos de escoamento, aumento da frequência das cheias e diminuição dos tempos de concentração. O uso do solo é uma componente que facilmente se modifica e, portanto, a resposta das bacias hidrográficas altera-se ao longo do tempo. Para avaliar os impactes destas modificações na resposta das bacias a eventos chuvosos pode recorrer-se a algumas metodologias. Uma das formas é utilizando modelos matemáticos que simulam o comportamento hidrológico das bacias, em função das suas características naturais e humanas. Dois dos modelos utilizados são o SWAT (Soil and Water Assessment Tool) e o KINEROS (KINematic Runoff and EROSion). O primeiro é um modelo contínuo que tem o dia como unidade temporal, servindo para determinar os efeitos a longo prazo de eventuais mudanças climáticas ou da ocupação do território (Costa, 2009). O segundo permite efectuar simulações para eventos de precipitação intensa, estimando a influência das modificações do uso do solo nos caudais (Costa, 2009). Os dois foram utilizados por Miller *et al.* (2002) para avaliar os impactes da evolução dos usos do solo em duas bacias norte-americanas. Na bacia de San Pedro (Estado do Arizona/México), devido à expansão das áreas urbanas e agrícolas, verificaram-se aumentos nos caudais médios anuais e nos caudais de cheia, e uma diminuição no tempo de concentração. Na bacia de Cannonsville (Estado de Nova Iorque) houve uma redução das áreas agrícolas em detrimento das áreas florestais, o que trouxe efeitos benéficos na resposta da bacia às chuvas. Por seu lado, Costa (2009) recorreu ao SWAT, não para determinar a influência da expansão urbana no comportamento hidrológico de 6 bacias hidrográficas da costa do Estoril (Algés, Jamor,

---

<sup>4</sup> G.T.Cheias (1985) *Estudo das Causas das Cheias na Região de Lisboa – Relatório Síntese. Bacia Hidrográfica da Ribeira da Laje*. MPAT, SEALOT, DGO, Lisboa.



Barcarena, Laje, Caparide e Vinhas), mas para verificar a adequabilidade deste modelo à simulação de caudais. Porém, nem sempre os resultados foram os melhores.

Os métodos descritos no parágrafo anterior permitem, essencialmente, compreender o comportamento das bacias em termos hidrológicos, mas para conhecer os caudais de ponta de cheia existe outro tipo de métodos, que também têm em conta as características de permeabilidade naturais e antrópicas. Por isso, as modificações nos caudais de ponta decorrentes da evolução da ocupação do solo são facilmente obtidas através dos métodos empíricos cinemáticos, onde estão englobados o método Racional e o do Soil Conservation Service (SCS).

O primeiro apresenta bons resultados em pequenas bacias hidrográficas (até 25/30 km<sup>2</sup>), perdendo rigor à medida que a dimensão das bacias aumenta. Isto acontece porque este método considera que os episódios de precipitação são uniformes a nível temporal e espacial (Hipólito *et al.*, 2006). Isto não oferece problemas em áreas pequenas, mas o mesmo já não acontece quando as áreas aumentam. Bichança (2006) aplicou o método Racional a uma bacia hidrográfica teórica antes e após a sua completa impermeabilização, alterando o valor do coeficiente de escoamento na fórmula deste método. Esta autora confirmou que os caudais seriam exponenciados.

Quanto ao método do SCS, é mais recente e relativamente mais complexo do que o Racional, o que possibilita a estimativa dos caudais de ponta com mais certezas para bacias de maior dimensão.

Através da utilização deste método, Duarte *et al.* (2005) constataram que, entre 1969 e 2000, o caudal de ponta da ribeira da Póvoa passou de 115,43 m<sup>3</sup>/s para 121,29 m<sup>3</sup>/s, como resultado de um aumento das áreas urbanizadas (passaram de 13,4 para 65%). De referir que estes cálculos foram feitos com recurso aos valores horários de precipitação registados na estação de São Julião do Tojal aquando da cheia de 1967. Também Shi *et al.* (2005), aplicando o método do SCS, verificaram que o processo de urbanização que ocorreu na bacia do rio Buji (China) conduziu a aumentos nos caudais de ponta de cheia. Por outro lado, Portela *et al.* (2000) aplicou este método para projectar os caudais de ponta para dois cenários hipotéticos numa parte da bacia do rio Maior. No ano de 2000, esta bacia tinha 7% da sua superfície ocupada por áreas urbanas, sendo que, no cenário 1 esse número seria de 20% e no cenário 2 de 40%. Estes autores verificaram que, para precipitações com período de retorno de 100 anos, os caudais de ponta seriam incrementados em 21%, no caso do cenário 1, e em 49% no caso do cenário 2. Para um período de retorno de 500 anos, existiriam aumentos de 19% (cenário 1) e de 45% (cenário 2).

Ainda relativamente ao método do SCS, Correia (1983a) explica com detalhe a sua utilização e como se calculam todos os seus parâmetros. Porém, Correia (1983b) admite algumas dificuldades de aplicação deste método em Portugal e, como tal, apresentou um modelo com algumas correcções relativamente ao original.

Todavia, existem autores que recorrem a outro tipo de modelos computacionais para estimar a influência da urbanização nos caudais de ponta, mas que utilizam os números de escoamento (CN) do SCS para obter a infiltração. Tanto Brath *et al.* (2006), como Saghafian *et al.* (2008) fizeram uso de modelos de precipitação-escoamento nos seus estudos sobre as bacias do rio Samoggia (Itália) e do rio Golestan (Irão), respectivamente. Ambos comprovaram que as mudanças nas ocupações do solo conduziram a aumentos dos caudais de ponta de cheia.

A avaliação dos caudais de ponta pode ser feita igualmente através dos métodos empíricos não cinemáticos. Especificamente para Portugal Continental existem duas fórmulas, a de Loureiro (1984) e a de Portela e Dias (2003). O método de Loureiro considerou os valores dos caudais máximos instantâneos anuais de 55 estações hidrométricas, enquanto o de Portela e Dias (2003) considerou os registos de 120 estações (Ramos, 2009). Assim sendo, o segundo método acrescenta mais informação na estimativa dos caudais de ponta em secções não monitorizadas do país.

Existem ainda os métodos estatísticos que também são muito utilizados. Os que melhor se adaptam à realidade dos rios portugueses são os de Gumbel e de Pearson tipo 3, ainda que o mais indicado seja o segundo (Henriques, 1985).

Para além dos caudais de ponta de cheia, outra componente que faz parte do comportamento hidrológico das bacias hidrográficas é o tempo de concentração. Existem várias fórmulas para obter este parâmetro, mas a que melhor se aplica às pequenas bacias portuguesas, especialmente às localizadas na região de Lisboa, é a de Temez (Correia, 1983b). A maioria dos autores portugueses utiliza este método, contudo, há quem calcule mais do que um para efeitos de comparação, como acontece com Reis (1996). Outro método de cálculo é o do FAA (Federal Aviation Administration – EUA), que considera as características do substrato geológico, solos e uso do solo das bacias hidrográficas, embora só deva ser aplicado em pequenas bacias urbanas. Outra forma de avaliar a influência da permeabilidade natural e antrópica nos tempos de concentração é recorrendo ao método do SCS.

A ocupação/utilização que se faz de um determinado espaço determina a vulnerabilidade dos elementos expostos aí instalados. Logo, as diferentes ocupações de locais

sujeitos a cheias (leitos de cheia) fazem com que existam vulnerabilidades distintas. A verdade é que a avaliação desta componente do risco ainda não é muito comum em Portugal e, por isso, são poucos os estudos que abordam este tema. Na AML Norte Duarte *et al.* (2005) fizeram-no para parte da bacia da ribeira da Póvoa. Dentro dos leitos de cheia os diferentes tipos de usos foram delimitados, sendo-lhes atribuído um valor que varia entre 1 e 3 (tal como tinham feito para a perigosidade). O valor 1 (vulnerabilidade baixa) foi conferido às áreas agrícolas abandonadas, terrenos incultos e “vazios urbanos”; o valor 2 (vulnerabilidade média) às áreas agrícolas e jardins; e o valor 3 (vulnerabilidade elevada) às áreas residenciais, comerciais e industriais. A avaliação do risco potencial nesta bacia resultou do cruzamento da informação dos mapas de perigosidade e de vulnerabilidade produzidos. Este cruzamento originou uma escala de 1 a 9, sendo que 1 corresponde a um risco mínimo e 9 a um risco máximo. Em termos cartográficos, o risco potencial foi representado em cinco classes: muito baixo, baixo, médio, elevado e muito elevado.

A leitura da bibliografia citada permitiu enquadrar o trabalho que se desenvolve nos capítulos seguintes.

## **2. METODOLOGIA**

### **2.1. RECOLHA DE INFORMAÇÃO**

Um dos primeiros passos num estudo desta natureza é a recolha da informação de carácter espacial que, posteriormente, serve de base a todo o trabalho. Foi utilizada a informação digital relativa a: altimetria e à hidrografia na escala 1:25 000 (cartas nº: 388, 389, 402, 403, 415, 416, 417, 429, 430 e 431); geologia na escala 1:500 000 (correspondente às cartas nº: 30-C e D; 34-A, B, C e D, na escala 1:50 000); uso/ocupação do solo nos anos de 1990 e de 2006 do IGP na escala 1:100 000 (Corine Land Cover); e Zonas Ameaçadas pelas Cheias (ZAC), cedidos por Ramos *et al.* (2010). Foram também utilizados os ortofotomapas referentes ao ano de 2005 (1:10 000) da área em estudo.

Outra informação indispensável é a que se refere à precipitação e ao escoamento/caudal. Para tal, recorreu-se às redes meteorológica e hidrométrica do INAG (Instituto Nacional da Água), sendo os dados retirados do site do SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos). É importante referir que foram escolhidas apenas as estações cuja quantidade e qualidade dos dados permitissem fazer uma análise correcta e segura, ou seja, que apresentassem séries minimamente longas e com poucas falhas.

Foram então recolhidos dados de precipitação mensal, diária e diária máxima anual das seguintes estações udométricas: Arranhó (20C/03G), Cacém (21B/10G), Caneças (21B/11UG), Milharado (20B/06UG), Quinta do Pisão (21A/08UG), Sacavém de Cima (21C/01UG) e São Julião do Tojal (20C/01C). Quanto à precipitação horária, os dados foram retirados das estações de Barragem Rio da Mula (21A/10G), Cacém, Calhandriz (20C/04UG), Caneças, Linhó (21A/09G), Lousa (20B/03CG), Malveira da Serra (21A/12G), Milharado e São Julião do Tojal.

## **2.2. TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO**

Depois de recolhida a informação, houve necessidade de proceder ao seu tratamento, assim como à escolha dos métodos de análise mais ajustados para cada situação. Em primeiro lugar, no programa ArcGIS foi feita a georreferenciação dos mapas topográficos de modo a obter a informação hidrográfica e altimétrica. Posteriormente, procedeu-se à delimitação das bacias hidrográficas com base na altimetria e na hidrografia.

Com este trabalho concluído foi possível avançar para a análise dos factores permanentes que condicionam a susceptibilidade às cheias das bacias hidrográficas. Refira-se desde já que, os solos não foram considerados neste estudo, porque a permeabilidade dos solos existentes na AML depende, em grande parte, das características hidrológicas da respectiva rocha-mãe. Este facto, aliado a questões de tempo, explica a opção da não inclusão deste factor na investigação.

Começando pelo factor geometria, existem quatro componentes relevantes que importam quantificar: área, perímetro, comprimento e forma da bacia (Ramos, 2009). A área e o perímetro são calculados automaticamente pelo ArcGIS, enquanto o comprimento pode ter diversos critérios de medição. Optou-se pelo critério de Linsley *et al.* (1988), que define o comprimento da bacia como a distância em linha recta a partir da desembocadura até ao interflúvio próximo da cabeceira do curso de água principal. A definição do curso de água principal é uma questão importante, e para a qual também existem vários critérios. Neste caso, decidiu-se escolher, em cada bifurcação, o curso de água com maior magnitude; se ambos os canais apresentarem a mesma magnitude, opta-se pelo que possuir um menor ângulo de confluência; se ainda assim o ângulo de confluência for semelhante, então escolhe-se o curso de água mais longo. Por último, utilizaram-se alguns índices que permitem a comparação entre bacias. Os índices utilizados foram os seguintes:

- Factor Forma (Horton)

$$Ff = \frac{A}{Cb^2}$$

A = área da bacia (km<sup>2</sup>); Cb = comprimento da bacia (km)

Varia entre 0,1 (bacia alongada) e 0,9 (bacia arredondada).

- Índice de Gravelius ou Coeficiente de Compacidade

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

P = perímetro da bacia (km); A = área da bacia (km<sup>2</sup>)

No mínimo será igual a 1, sendo, nesse caso, uma bacia circular. Até 1,6 uma bacia é considerada compacta.

- Índice de Circularidade (Miller)

$$Ic = \frac{4\pi A}{P^2}$$

A = área da bacia (km<sup>2</sup>); P = perímetro da bacia (km)

Quanto mais o resultado se aproximar de 1 (valor máximo), mais circular será a bacia.

- Índice de Alongamento (Schumm)

$$Ia = \frac{2\sqrt{(A/\pi)}}{Cb}$$

A = área da bacia (km<sup>2</sup>); Cb = comprimento da bacia (km)

O resultado pode variar entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de 0 for o valor, mais alongada será a bacia.

O segundo factor a entrar na equação dos factores permanentes é a zona vadosa das bacias, tendo sido considerado o substrato geológico. Ao contrário dos outros factores (geometria, drenagem e relevo) não existem propriamente índices definidos para classificar o substrato quanto à sua permeabilidade. No entanto, é possível avaliar a permeabilidade do substrato de uma bacia hidrográfica em função das características das formações geológicas

que a compõem. Para isso, a cada formação presente nas bacias estudadas foi atribuído um valor entre 1 (mínima permeabilidade) e 10 (máxima permeabilidade), tendo como suporte a classificação das várias litologias existentes na Área Metropolitana de Lisboa (Ramos *et al.*, 2010). Todavia, como afirma Reis (2006), a identificação da permeabilidade encerra várias dificuldades, entre as quais, o desconhecimento, com suficiente pormenor, das propriedades dos litofácies (tal como da sua variação espacial) ou do grau de fracturação das rochas. Para simplificar a análise, estes valores foram agrupados em cinco classes de permeabilidade: muito reduzida ( $\leq 2$ ), reduzida (3 a 4), média ou variável (5), elevada (6 a 7) e muito elevada ( $\geq 8$ ). Importar referir que aos planos de água foi atribuído o valor 0 (zero).

Em termos práticos, interessava saber quais as áreas (em termos percentuais) de cada bacia cujo substrato é pouco permeável. Como tal, foram somadas as áreas que apresentam valores de permeabilidade entre 0 e 4.

$$Pr = \frac{(a0 + a1 + a2 + a3 + a4)}{A} \times 100$$

Pr = % de área da bacia com permeabilidade reduzida; a0 = área com valor de permeabilidade 0; a1 = área com valor de permeabilidade 1; a2 = área com valor de permeabilidade 2; a3 = área com valor de permeabilidade 3; a4 = área com valor de permeabilidade 4; A = área da bacia (km<sup>2</sup>).

Por outro lado, interessava igualmente conhecer a percentagem da área de cada bacia em que o substrato é bastante permeável, e, para isso, somaram-se as áreas com valores entre 6 e 9.

$$Pe = \frac{(a6 + a7 + a8 + a9)}{A} \times 100$$

Pe = % de área da bacia com permeabilidade elevada; a6 = área com valor de permeabilidade 6; a7 = área com valor de permeabilidade 7; a8 = área com valor de permeabilidade 8; a9 = área com valor de permeabilidade 9; A = área da bacia (km<sup>2</sup>).

Importa esclarecer que o facto de se conhecer a percentagem de área praticamente impermeável não significa saber automaticamente a % de área permeável, e vice-versa, uma vez que as áreas que apresentam uma permeabilidade média (valor 5) podem variar, daí o

interesse em conhecer os dois valores. O outro índice calculado relativo ao substrato é a média ponderada da permeabilidade de cada bacia através da fórmula:

$$P = \frac{\sum p_i a_i}{A}$$

P = permeabilidade média;  $p_i$  = valor de permeabilidade;  $a_i$  = área de cada valor de permeabilidade; A = área da bacia (km<sup>2</sup>).

Para efeitos de representação espacial, as formações geológicas foram divididas em formações consolidadas e não consolidadas conforme a legenda internacional dos mapas hidrogeológicos (anexo 1).

Passando agora ao relevo, este factor foi representado espacialmente através de modelos digitais de terreno de cada bacia de drenagem. A partir destes foram feitos mapas de declives com um tamanho de pixel de 10 metros.

De modo a compreender a componente relevo nas bacias estudadas foram calculados diversos indicadores e índices enunciados de seguida:

- Altitude média da bacia

$$Z = \frac{\sum z_i A_i}{A}$$

Z = altitude média da bacia (metros);  $z_i$  = altitude média de cada classe altitudinal considerada (metros);  $A_i$  = área dessa classe altitudinal (km<sup>2</sup>); A = área da bacia (km<sup>2</sup>)

De referir que as classes de altitude consideradas têm uma amplitude de 50 metros.

- Altura média da bacia

$$H = \frac{\sum h_i A_i}{A}$$

H = altura média da bacia (metros);  $h_i$  = altura média de cada classe altitudinal considerada (metros);  $A_i$  = área dessa classe altitudinal (km<sup>2</sup>); A = área da bacia (km<sup>2</sup>)

A forma de obter a altura média de cada bacia é idêntica à da altitude média, a diferença é que enquanto a altitude se obtém tendo como referência o nível médio do mar, a altura obtém-se tendo como referência a cota correspondente ao nível mínimo de altitude da bacia.

- Amplitude altimétrica

$$D = AM - Am$$

D = amplitude altimétrica (metros); AM = altitude máxima da bacia (metros); Am = altitude mínima da bacia (metros)

- Coeficiente Orográfico (Fourier)

$$Co = \frac{H^2}{A}$$

Co = coeficiente orográfico; H = altura média da bacia (metros); A = área da bacia (km<sup>2</sup>)

- Índice de Rugosidade (Melton)

$$Ir = D \times Dd$$

Ir = índice de rugosidade; D = amplitude altimétrica (metros); Dd = densidade de drenagem  
Este índice é tanto maior quanto mais acidentada for uma bacia.

- Relação de Relevo (Schumm)

$$Rr = D/Cb$$

Rr = relação de relevo; D = amplitude altimétrica (metros); Cb = comprimento da bacia medido paralelamente ao curso de água principal (metros)

Quanto maior for o seu valor mais rápida é a chegada das águas à desembocadura da bacia.

- Índice de Declive de Roche

$$IdR = \frac{AM - Am}{Le}$$

IdR = índice de declive de Roche (m/km); AM = altitude máxima da bacia (metros); Am = altitude mínima da bacia (metros); Le = comprimento do rectângulo equivalente da bacia (km)



Obtém-se o rectângulo equivalente através da seguinte fórmula:

$$Le = 0,89 Kc \sqrt{A} (1 + (\sqrt{1 - (1,12/Kc)^2})$$

Le = comprimento do rectângulo equivalente da bacia (km); A = área da bacia (km<sup>2</sup>); Kc = índice de Gravelius

- Inclinação média do curso de água principal

$$I = d/c$$

I = inclinação média do curso de água principal (m/km); d = desnível entre a cabeceira e a desembocadura do curso de água principal (metros); c = comprimento curso de água principal (km)

No que diz respeito à rede de drenagem, a sua avaliação pode ser efectuada tendo em conta algumas características como a hierarquia, a magnitude e o comprimento do curso de água principal, contudo estas variáveis não permitem efectuar comparações entre bacias hidrográficas com áreas substancialmente diferentes, dado que, resultam em valores absolutos (não ponderados pela área). A hierarquia (Strahler) atribui uma classificação aos cursos de água consoante a sua importância. Os canais que não têm tributários são classificados como tendo ordem 1, os de ordem 2 são os que resultam da confluência de dois canais de ordem 1, os de ordem 3 são os que derivam da confluência de dois canais de ordem 2 e assim sucessivamente (Ramos, 2009). À partida, quanto maiores forem as dimensões das bacias, maiores serão os valores obtidos. O mesmo acontece com a magnitude (Shreve), que corresponde ao número de canais de hierarquia 1, segundo o critério de Strahler (Ramos, 2009).

Assim, para além da hierarquia, da magnitude e do comprimento do curso de água principal foram calculados vários índices que permitem estabelecer comparações entre as bacias estudadas:

- Densidade de Drenagem (Horton)

$$Dd = Ct/A$$

Dd = densidade de drenagem (km/km<sup>2</sup>); Ct = comprimento total dos cursos de água da bacia (km); A = área da bacia (km<sup>2</sup>)

Pode considerar-se que, no contexto da Orla Mesocenozóica Ocidental, uma bacia com uma densidade de drenagem igual ou superior a 3 km/km<sup>2</sup> é uma bacia bem drenada. De notar que, para uma quantificação correcta do comprimento total dos cursos de água, foi necessário fazer algumas alterações à hidrografia original das bacias hidrográficas, nomeadamente eliminar as valas utilizadas para a agricultura, e que estão representadas nos mapas como sendo linhas de água. Como se pretende estudar as condições naturais das bacias, seria incorrecto assumir essas estruturas como sendo linhas de água naturais.

- Densidade Hídrica (Horton)

$$Dh = N/A$$

Dh = densidade hídrica (nº de cursos de água/ km<sup>2</sup>); N = número total de cursos de água (corresponde à magnitude da bacia); A = área da bacia (km<sup>2</sup>)

Enquanto a densidade de drenagem fornece a informação relativa ao número médio de km de cursos de água existentes por km<sup>2</sup>, a densidade hídrica diz quantas linhas de água existem na mesma área. Desta forma, estes dois índices complementam-se.

- Coeficiente de Manutenção (Schumm)

$$Cm = \frac{1}{Dd} \times 1000$$

Cm = coeficiente de manutenção (metros); Dd = densidade de drenagem (km/km<sup>2</sup>)

Quanto mais baixo for o valor, mais rápida é a concentração da água que provém da precipitação nos canais fluviais.

- Coeficiente de Torrencialidade (Vivas)

$$Ct = Dh \times Dd$$

Dh = densidade hídrica; Dd = densidade de drenagem

É um índice utilizado essencialmente em pequenas bacias hidrográficas, que possuem, por isso, um escoamento com carácter torrencial, sendo a torrencialidade da bacia tanto maior quanto mais elevado for o valor do índice.

Os valores obtidos através de todos estes cálculos permitem comparar as bacias, índice a índice, contudo, para dotar esta análise de uma maior robustez, foram combinados os índices de cada componente física das bacias (geometria, substrato, relevo e rede de drenagem). É importante referir que a bacia hidrográfica do rio Trancão não faz parte da análise descrita a seguir. A opção de a deixar de fora prende-se, sobretudo, com a repetição da informação, ou seja, a área das suas cinco sub-bacias (Póvoa, Loures, Fanhões, Alpriate e a própria sub-bacia do Trancão) representa quase 95% da bacia do rio Trancão. Portanto, se esta bacia tivesse sido introduzida, estaria a tornar esta análise repetitiva e, de certa forma, incorrecta.

A forma como se combinaram os índices obedeceu aos seguintes critérios:

1) Escolheram-se os índices que são passíveis de serem comparados entre bacias. Assim sendo, para a geometria seleccionaram-se: factor forma, índice de Gravelius, índice de circularidade, índice de alongamento. Para o substrato geológico escolheram-se: permeabilidade média, percentagem da área da bacia com permeabilidade reduzida, percentagem da área da bacia com permeabilidade elevada. Para o relevo foram seleccionados: coeficiente orográfico, índice de rugosidade, relação de relevo, índice de declive de Roche, inclinação média do curso de água principal. Para terminar, para a rede de drenagem foram escolhidos: densidade de drenagem, densidade hídrica, coeficiente de manutenção, coeficiente de torrencialidade. De notar que houve uma preocupação relativamente aos índices escolhidos, para que estes não introduzissem redundância na análise.

2) Os resultados dos índices de cada uma das bacias foram divididos em quatro classes de igual amplitude. Optou-se por fazer a divisão em quatro classes depois da aplicação do critério de Sturges<sup>5</sup>, cujo resultado foi de 4,46 classes. Deste modo, em cada índice as bacias têm valores entre 1 e 4 em função da classe a que pertencem. O valor 1 foi atribuído às bacias com menor susceptibilidade às cheias, e o valor 4 às bacias com maior susceptibilidade. Por exemplo, às bacias que possuírem os resultados mais elevados no factor forma é lhes atribuído o valor 4, enquanto às que apresentarem os resultados mais baixos é lhes atribuído o valor 1. Existem casos em que a lógica é invertida, como no caso do índice de Gravelius, em que quanto mais baixo for o resultado maior será a susceptibilidade da bacia às cheias. Nesses casos o valor máximo (4) será atribuído às bacias cujos resultados do índice forem mais baixos. Todavia, não é obrigatório que todas as classes estejam representadas, uma vez que

---

<sup>5</sup>  $m = 1 + 3,32193 \log n$ , em que 'm' é o nº de classes e 'n' é o número de bacias estudadas.

podem existir índices, com diferenças grandes nos resultados, em que uma das classes intermédias (de valor 2 ou 3) não exista.

3) Os valores atribuídos de cada índice foram somados por componente e divididos pelo nº total de índices de cada componente. Por exemplo, para o caso da componente geometria, o total de cada bacia hidrográfica foi dividido por quatro, já que foram utilizados quatro índices (factor forma, índice de Gravelius, índice de circularidade e índice de alongamento). Este procedimento resultou num valor final ponderado, permitindo ordenar as bacias, por componente, quanto à sua susceptibilidade às cheias. Com base neste valor final, as bacias de drenagem foram agrupadas em cinco classes de susceptibilidade: muito elevada, elevada, moderada, reduzida e muito reduzida. Essas classificações foram obtidas através da divisão dos valores finais de cada componente em cinco classes de igual amplitude. Porém, e para que esta divisão não fosse demasiado rígida, foram efectuados pequenos ajustamentos na amplitude das classes quando necessários.

4) Por fim, obteve-se a classificação das bacias, quanto às componentes físicas (factores permanentes) que influenciam o seu comportamento relativamente às cheias. Optou-se por atribuir um “peso” maior aos factores relevo e substrato comparativamente aos outros dois factores. Assim, o relevo tem o dobro do “peso” da geometria e da rede de drenagem, enquanto o substrato pesa três vezes mais. Em relação ao relevo, foi tomada esta opção porque este factor tem uma interferência directa na energia potencial da água e na velocidade do escoamento. Por outro lado, e apesar da AML Norte não possuir um relevo especialmente acidentado, existem algumas diferenças entre as bacias, o que faz com que estas apresentem comportamentos distintos quando ocorrem cheias. Quanto ao substrato, foi considerado o factor mais importante, essencialmente, por duas razões: a) a permeabilidade da zona vadosa é a componente que mais interfere com a infiltração da água e, como tal, com a produção do escoamento superficial; b) a rede de drenagem, fundamental na facilidade de concentração do escoamento superficial, está essencialmente dependente das características do substrato geológico. No fundo, esta classificação reflecte a predisposição natural das bacias para serem afectadas por cheias, sendo obtida através da seguinte expressão:

$$ISfp = (1 \times G + 3 \times S + 2 \times R + 1 \times D)/7$$

ISfp = índice de susceptibilidade dos factores físicos permanentes; G = valor ponderado da geometria; S = valor ponderado do substrato geológico; R = valor ponderado do relevo; D = valor ponderado da rede de drenagem.

Para além da metodologia descrita, que pretendia obter uma classificação das bacias hidrográficas quanto à sua susceptibilidade ao fenómeno das cheias, recorreu-se igualmente à análise de clusters. Este método foi utilizado por duas razões. Em primeiro lugar porque permite testar/validar a metodologia referida anteriormente. Em segundo lugar porque facilita a compreensão das relações de proximidade que se estabelecem entre as bacias, ou seja, é possível conhecer as semelhanças e diferenças entre as diversas unidades de análise (neste caso entre as bacias de drenagem). Para tal, foi utilizado o programa Statistica, onde foram introduzidos os resultados dos índices calculados anteriormente, e que foram os mesmos usados para obter o índice de susceptibilidade dos factores permanentes. De seguida, esses valores foram estandardizados para que a análise fosse correcta. Optou-se por escolher, como medida de distância entre elementos, a distância euclidiana e, como critério de agregação, o *unweighted pair-group average*, já que é o critério mais aconselhado e utilizado (Romesburg, 1984). Assim sendo, foram efectuadas quatro análises de clusters, uma por cada factor permanente. De notar que, ao contrário da opção tomada para se estabelecer o índice de susceptibilidade dos factores permanentes, na análise de clusters foi introduzida a bacia do rio Trancão, até porque permite enquadrar as suas sub-bacias e perceber as diferenças existentes dentro da bacia “principal” (Trancão).

Passando agora para os factores variáveis (uso e ocupação do solo), foi utilizada a informação das cartas Corine para duas datas diferentes (1990 e 2006), com o intuito de se perceber como evoluiu a utilização do solo nas diversas bacias hidrográficas. Assim sendo, e já que é a informação mais recente, assumiu-se que 2006 representará a situação actual, embora se reconheça que, cinco anos depois, a realidade já não é a mesma, pois sabe-se que a Área Metropolitana de Lisboa é um território em constante evolução.

Voltando às cartas Corine propriamente ditas, as designações atribuídas na sua classificação foram agrupadas em três classes em função da sua natureza: áreas edificadas, áreas agrícolas e áreas florestais e silvestres (quadro 1).

Áreas edificadas	Áreas agrícolas	Áreas florestais e silvestres
Tecido urbano contínuo	Culturas temporárias de sequeiro	Espaços verdes urbanos
Tecido urbano descontínuo	Culturas temporários de regadio	Florestas de folhosas
Indústria, comércio e equipamentos gerais	Arrozais	Florestas de resinosas
Redes viárias e ferroviárias e espaços associados	Vinhas	Florestas mistas
Aeroportos e aeródromos	Pomares	Pastagens permanentes
Áreas de extracção mineira/inertes	Culturas temporárias e/ou pastagens associadas a culturas permanentes	Pastagens naturais
Áreas de deposição de resíduos	Sistemas culturais e parcelares complexos	Matos
Áreas em construção	Agricultura com espaços naturais e semi-naturais	Vegetação esclerófila
Equipamentos desportivos, culturais e de lazer e zonas históricas		Florestas abertas, cortes e novas plantações
		Áreas ardidas

**Quadro 1** – Classes de uso do solo

Ao contrário das componentes permanentes, os factores variáveis estão em constante mudança. Por isso, interessava perceber não só o sentido de evolução dos vários usos do solo no período de tempo estudado (16 anos), mas também a velocidade dessa evolução. Como tal, foram calculadas, para todas as bacias, as respectivas percentagens de áreas edificadas, de áreas agrícolas, e de áreas florestais e silvestres (quadro 1), assim como, as % de evolução entre 1990 e 2006.

Para as componentes variáveis, o objectivo passava igualmente por estabelecer uma classificação das bacias quanto à sua susceptibilidade à ocorrência de cheias.

Assumiu-se que o que importava conhecer era: 1) a % da superfície ocupada por áreas edificadas na data mais recente (2006); 2) a % de aumento dessas mesmas áreas entre 1990 e 2006; 3) a % da superfície ocupada por áreas florestais e silvestres em 2006. Como tal, foi seguida a mesma metodologia utilizada para os factores permanentes. Nos dois primeiros indicadores, aos resultados mais elevados foi-lhes atribuído o valor 4 e aos resultados mais baixos foi-lhes atribuído o valor 1. No caso da % de áreas florestais e silvestres a lógica inverte-se, isto é, aos resultados mais elevados corresponde o valor 1 e aos resultados mais baixos corresponde o valor 4. Isto deve-se ao facto de as florestas fazerem diminuir a velocidade do escoamento superficial e favorecerem a infiltração, contribuindo para a redução dos caudais de ponta (Ramos, 2005). Há ainda que referir que se optou por atribuir um “peso” superior (2x) à % de áreas edificadas, já que, quando se fala da influência do uso do solo nas

cheias, o verdadeiro problema é precisamente a superfície impermeabilizada por áreas construídas. Assim sendo, a avaliação da susceptibilidade às cheias, baseada nos factores variáveis, foi obtida através da seguinte expressão:

$$ISfv = (2 \times Ae + 1 \times AumAe + 1 \times Afs)/4$$

ISfv = índice de susceptibilidade dos factores variáveis; Ae = valor das áreas edificadas na bacia em 2006 (%); AumAe = valor do aumento das áreas edificadas entre 1990 e 2006 (%); Afs = valor das áreas florestais e silvestres na bacia em 2006 (%).

Foi igualmente elaborada uma análise de clusters que englobou o conjunto dos parâmetros utilizados na análise dos factores variáveis. Os procedimentos foram exactamente os mesmos que foram determinados para os factores permanentes, isto é, foi utilizada a distância euclidiana e o critério do *unweighted pair-group average*.

Concluída quase toda a análise dos factores condicionantes, faltava apenas o último passo, que consistiu na junção dos valores obtidos para as componentes permanentes com os valores obtidos para as componentes variáveis. Esta combinação foi obtida através da fórmula seguinte:

$$ISfc = (1 \times G + 3 \times S + 2 \times R + 1 \times D + 3 \times Us)/10$$

ISfc = índice de susceptibilidade dos factores condicionantes; G = valor ponderado da geometria; S = valor ponderado do substrato geológico; R = valor ponderado do relevo; D = valor ponderado da rede de drenagem; Us = valor ponderado do uso do solo em 2006 (representa o resultado do índice de susceptibilidade dos factores variáveis).

Ao uso do solo foi atribuído um “peso” de 3. Isto acontece porque a ocupação do solo condiciona a permeabilidade das bacias hidrográficas. Por isso, o “peso” atribuído será igual ao do substrato geológico.

Para calcular o tempo de concentração das bacias hidrográficas foi utilizado o método de Temez, por ter apresentado bons resultados nas bacias que drenam a região de Lisboa (Correia, 1983b). Exprime-se através da seguinte fórmula:

$$Tc = 0,3(Ch/I^{0,25})^{0,76}$$

Tc = tempo de concentração (horas); Ch = comprimento do curso de água principal (km); I = inclinação média do curso de água principal (km/km)

Já para o cálculo do tempo de resposta das bacias de drenagem a fórmula é (Correia, 1983b):

$$Tr = Tc \times 0,6$$

Tr = tempo de resposta (horas); Tc = tempo de concentração (horas)

Recorreu-se igualmente ao método do Federal Aviation Administration (FAA). É um método norte-americano, apresentado em 1970, que foi desenvolvido para a drenagem de aeroportos e aeródromos, mas que também tem sido utilizado para estudar o escoamento superficial em áreas urbanas (Chow *et al.*, 1988). O método do FAA permite entender qual o efeito que o substrato geológico e a ocupação do território têm no aumento da velocidade das cheias. Como tal, foram calculados os tempos de concentração das bacias para 1990 e para 2006, através da seguinte fórmula:

$$Tc = \frac{3,26(1,1 - C)Ch^{0,5}}{Db^{0,333}}$$

Tc = tempo de concentração (minutos); C = coeficiente de escoamento superficial; Ch = comprimento do curso de água principal (metros); Db = declive médio da bacia (%)

O coeficiente de escoamento superficial foi definido através do quadro 2, e apresenta, naturalmente, valores diferentes em 1990 e em 2006 face à evolução do uso do solo. Quanto ao valor do declive médio da bacia em %, este pode ser obtido com base no índice de declive de Roche, através da fórmula descrita a seguir:

$$Db = (D/Le) \times 100$$

Db = declive médio da bacia (%); D = amplitude altimétrica (metros); Le = comprimento do rectângulo equivalente da bacia (metros)



ZONAS URBANAS		
TIPO DE OCUPAÇÃO		COEFI- CIENTE
Relvados	solo arenoso, plano (declive até 2%)	0,05 - 0,10
	solo arenoso, declive médio (2 - 7%)	0,10 - 0,15
	solo arenoso, declive grande (> 7%)	0,15 - 0,20
Zonas comerciais	áreas centrais	0,70 - 0,95
	áreas periféricas	0,50 - 0,70
Zonas residenciais	moradias	0,30 - 0,50
	blocos residenciais afastados	0,40 - 0,60
	blocos residenciais próximos	0,60 - 0,75
	áreas suburbanas	0,25 - 0,40
	áreas de apartamentos	0,50 - 0,70
Zonas industriais	dispersas	0,50 - 0,80
	densas	0,60 - 0,90
Parques, cemitérios		0,10 - 0,25
Campos de jogos		0,20 - 0,35
Parques ferroviários		0,20 - 0,40
Zonas não aproveitadas		0,10 - 0,30
Vias (automóveis e peões)		0,75 - 0,85
Telhados		0,75 - 0,95

ZONAS AGRÍCOLAS		
TIPO DE OCUPAÇÃO		COEFI- CIENTE
Com infiltração acima da média	culturas	0,20
	pastagens	0,15
	bosques e florestas	0,10
Com infiltração média, sem lenticulas de argila, lodos e solos equivalentes	culturas	0,40
	pastagens	0,35
	bosques e florestas	0,30
Com infiltração superior à média, solos argilosos densos ou solos com rocha próxima da superfície e solos delgados sobre rocha impermeável	culturas	0,50
	pastagens	0,45
	bosques e florestas	0,40

**Quadro 2** – Valores do coeficiente de escoamento superficial para cada tipo de ocupação do solo  
(in Carvalho, 1998: p. 196)

Todavia, é preciso referir que o método do FAA se destina à aplicação em bacias urbanas e que, as bacias hidrográficas da AML Norte não são exactamente bacias urbanas, uma vez que ainda se encontram em processo de urbanização. Daqui resulta que, os tempos de concentração calculados através deste método são inferiores aos obtidos através do método de Temez, que são os mais correctos. E a verdade é que, se se substituir o valor do coeficiente de escoamento superficial de cada bacia (C) por 0,10 (representativo de uma bacia com um substrato geológico muito permeável e totalmente ocupada por floresta), os resultados do FAA são praticamente iguais aos de Temez. Isto significa que, se na fórmula do FAA a permeabilidade (expressa pelo factor C) for “anulada”, os resultados são semelhantes aos do método de Temez. Porém, apesar dos valores resultantes do método norte-americano não serem os mais correctos, permitem conhecer a variação dos tempos de concentração entre 1990 e 2006, não em termos absolutos, mas em termos relativos.

Como os dados hidrométricos não permitem efectuar o tipo de análise pretendida, recorreu-se ao método de Portela e Dias (2003), que estima os caudais de ponta para diversos períodos de retorno, mesmo quando não existem registos hidrométricos. As bacias hidrográficas estudadas estão inseridas na região litoral a Norte do rio Tejo, sendo calculados,

para todas elas, os respectivos caudais de ponta de cheia para os períodos de retorno de 1, 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Procurou-se igualmente aumentar a escala de análise, pois interessava igualmente saber como evoluíram os usos do solo nas suas ZAC (Zonas Ameaçadas pelas Cheias). Para isso ser possível foram utilizadas as ZAC, definidas em Ramos *et al.* (2010), e as cartas Corine de 1990 e de 2006.

No que diz respeito aos factores desencadeantes, o que se procurou fazer em primeiro lugar foi a caracterização espacial e temporal da precipitação na AML Norte. Depois relacionou-se a distribuição das chuvas ao longo do ano com a repartição das precipitações extremas, definidas através do percentil 95. Quanto aos períodos de retorno das precipitações diárias máximas anuais, foram calculados através da lei de Gumbel, que é reconhecida como a que melhor caracteriza as precipitações intensas no território português (Pereira, 1995; *in* Portela *et al.*, 2000).

Relativamente às cheias, foi gerado um inventário dos eventos ocorridos na AML Norte. Este resulta de uma base de dados criada para Portugal Continental por Quaresma (2008), que não inclui apenas cheias, mas também movimentos de vertente. A recolha dos eventos aí incluídos foi feita a partir de notícias de jornais e, por isso, só fazem parte do inventário os fenómenos naturais que resultaram em consequências humanas e/ou materiais. Aos eventos seleccionados por Quaresma (2008) foi acrescentada a cheia de 18/02/2008, que não está presente na base de dados original, uma vez que esta termina no ano de 2006. Naturalmente que, tendo conhecimento desse evento, optou-se por incluí-lo no inventário, no entanto, não foi definido o número nem os locais das ocorrências. Esta opção foi tomada porque a consulta de jornais com o intuito da identificação de eventos e de ocorrências não fazia parte dos objectivos deste trabalho. Por outro lado, não seria correcto estar incluir no inventário apenas as ocorrências mais “mediáticas” ou com maior repercussão nos canais de televisão. Por outro lado, tendo em conta que a base de dados de Quaresma (2008) não referia nenhuma ocorrência na bacia da ribeira de Colares, o inventário foi complementado com a informação recolhida por Lavrador-Silva (2002), respeitante às cheias que aconteceram ao longo dos anos nessa bacia.

O problema da inexistência de registos horários de precipitação para a maioria dos eventos de cheia, aliado ao facto de os dados diários da rede meteorológica do INAG serem registados entre as 09h de um dia e as 09h do dia seguinte, obrigam a encontrar uma solução de recurso. Deste modo, em alguns eventos a melhor forma de estimar a precipitação máxima em 24 horas é recorrendo a dois registos diários: o do próprio dia da cheia e o do dia posterior

ou o do dia anterior. Eventualmente esta solução poderá resultar numa estimativa por excesso da precipitação, mas acaba por ser a melhor alternativa. Este problema já não se colocou para a cheia de 2008, pois existem dados horários, o que facilitou muito a análise, tornando-a ao mesmo tempo mais correcta. Para se perceber a distribuição espacial dos máximos de precipitação em 24 horas recorreu-se não só aos registos das estações do INAG, mas também aos dados relativos a algumas estações do Instituto de Meteorologia e Geofísica apresentados em Moreira *et al.* (2008).

Para se estimar os caudais de ponta atingidos na cheia de 2008, já que não existem dados hidrométricos, utilizou-se o Método Racional. Porém, reconhece-se que este não é, necessariamente, o melhor método para a obtenção dos caudais de ponta para as bacias analisadas, já que as suas áreas são maioritariamente superiores a 25/30 km<sup>2</sup>. Optou-se pelo Método Racional pela facilidade de aplicação e porque permite estabelecer a comparação entre realidades diferentes relativamente ao uso do solo, ou seja, é possível confirmar a influência da ocupação do território nos caudais de ponta de cheia. Provavelmente, o método mais adequado à dimensão destas bacias seria o do Soil Conservation Service, todavia, este reveste-se de uma maior complexidade de obtenção e, como tal, seria complicado em termos de tempo calculá-lo para 12 bacias. Desta forma, os caudais de ponta de cheia podem ser calculados através da expressão seguinte:

$$Q_p = \frac{C i A}{3,6}$$

$Q_p$  = caudal de ponta de cheia (m<sup>3</sup>/s);  $C$  = coeficiente de escoamento superficial (quadro 2);  $i$  = intensidade de precipitação com duração igual ao do tempo de concentração da bacia (mm/h);  $A$  = área da bacia.

Consoante a localização das bacias hidrográficas na AML Norte foi escolhida uma estação da rede do INAG com dados horários de precipitação para se calcular o respectivo caudal de ponta de cheia. Assim, foram utilizadas as seguintes estações: Barragem Rio da Mula (Vinhas), Malveira da Serra (Colares), Linhó (Caparide), Cacém (Barcarena e Laje), Caneças (Jamor e Póvoa), Lousa (Loures e Fanhões), Milharado (Trancão (B) e Trancão (SB)) e Calhandriz (Alpriate). Para o cálculo dos caudais de ponta da cheia de 2008 assumiu-se, em termos de uso do solo, que a situação nesse ano seria igual à de 2006, que é a data mais próxima com esse tipo de informação (cartas Corine). De modo a avaliar os impactes da alteração dos usos do solo nos picos de cheia foram calculados dois valores de caudal de

ponta para cada bacia (um para 1990 e outro para 2006). Para isso, alteraram-se os valores médios do coeficiente de escoamento superficial na fórmula do Método Racional, consoante as características de permeabilidade das bacias nos dois anos considerados.

### **2.3. DIFICULDADES E OBSTÁCULOS**

A primeira grande dificuldade está relacionada com a rede de drenagem (Reis, 1996). Como foi dito anteriormente, houve a necessidade de georreferenciar os mapas militares, no entanto, o facto de as diversas cartas utilizadas terem datas diferentes representa um problema, pois a modificação dos critérios de elaboração e a possível melhoria das técnicas de levantamento no campo, podem dar origem a resultados finais distintos (Reis, 1996). Ora, neste caso, a solução possível passou por utilizar os mapas com edição mais recente.

Ainda relativamente à hidrografia, outro dos obstáculos foi a existência de locais onde os cursos de água escoam subterraneamente devido à acção antrópica e que, por isso, não estão representados nos mapas topográficos mais recentes. Aqui a solução passou pelo recurso aos mapas militares mais antigos, cujas datas de edição fossem anteriores à canalização das linhas de água.

No que diz respeito ao substrato geológico, existe a questão das variações laterais de fácies que se observam no terreno e que não estão representadas nos mapas geológicos. Por exemplo, o Complexo Vulcânico de Lisboa possui características diferentes ao longo da sua extensão, o que significa que existem alterações no grau de permeabilidade. Assim, enquanto nos locais em que os materiais estão muito alterados a permeabilidade é, de facto, muito baixa, nos lugares em que o grau de alteração é menor a permeabilidade é superior. Portanto, e tomando em conta o mesmo exemplo do Complexo Vulcânico de Lisboa, assume-se na análise efectuada que a permeabilidade desta formação é sempre muito baixa, quando nem sempre é essa a realidade.

Um outro problema foi a atribuição dos valores de permeabilidade às aluviões, uma vez que, as suas texturas variam de montante para jusante, alterando, consequentemente, a sua permeabilidade (e o seu valor). De modo a superar esta dificuldade recorreu-se às notícias explicativas dos mapas geológicos para tentar perceber a natureza destas formações. Quando essas referências não existiam, então seguia-se o princípio da perda de capacidade de transporte dos cursos de água à medida que se aproximam da desembocadura. Isto é, os sedimentos transportados são progressivamente mais finos de montante para jusante. Assim, com base na classificação das permeabilidades das diversas litologias, definidas por Ramos *et*

*al.* (2010), optou-se por atribuir o valor 9 de permeabilidade às aluviões arenosas, o valor 6 às indiferenciadas e o valor 3 às argilosas.

Relativamente às precipitações diárias, os dados do INAG são registados entre as 09h de um dia e as 09h do dia seguinte, o que dificulta a análise sobretudo das precipitações extremas. De facto, uma precipitação que dê origem a cheias pode estar repartida por dois registos, dependendo da hora do dia a que aconteça. Também a pequena dimensão das séries de dados horários não permitiu analisar da forma mais correcta os eventos contabilizados, excepto no caso das cheias de 2008.

Por último, e não menos importante, é a questão da falta de dados hidrométricos, que, de facto, são muito escassos na região de Lisboa. Esta situação obrigou a fazer toda a análise referente aos caudais de ponta de cheia das bacias hidrográficas com recurso aos dados de precipitação.

## **CAPÍTULO II**

### **FACTORES CONDICIONANTES DAS CHEIAS**

A ocorrência de cheias rápidas está dependente de um conjunto de factores que pode ser dividido em dois tipos: factores condicionantes e factores desencadeantes (que serão desenvolvidos no capítulo III). No fundo, os factores condicionantes determinam o grau de predisposição das bacias hidrográficas para serem afectadas por cheias, sendo que, teoricamente, quanto maior for este grau de predisposição, maior será a frequência e a magnitude destes fenómenos. Desta forma, qualquer factor que afecte a quantidade de água que entra na bacia, ou a velocidade com que a água se move dentro desta, irá alterar a magnitude dos caudais de ponta (Booth, 1991). Por outro lado, e como referem Smith e Ward (1998), a maioria destas componentes actua no sentido de acelerar o movimento da água dentro da bacia.

Estes factores condicionantes podem ainda ser subdivididos em dois grupos: factores permanentes ou físicos e factores variáveis.

#### **1. FACTORES PERMANENTES**

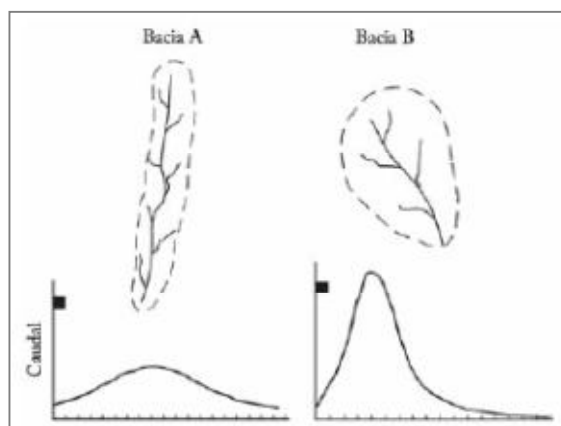
As componentes permanentes das bacias hidrográficas são aquelas que dificilmente se alteram à escala da vida humana: geometria, substrato geológico, relevo, rede de drenagem e solos (que não foram considerados neste estudo).

##### **1.1. GEOMETRIA**

As características geométricas mais relevantes no estudo das cheias são a área e a forma das bacias hidrográficas (Ramos, 2009). A área assume uma importância óbvia, já que, à partida, quanto maior for a superfície de uma bacia, maior será o escoamento na sua secção

de referência e, portanto, maior será o seu caudal de ponta em situações de cheia (Reis, 1996; Smith e Ward, 1998; Ramos, 2009). Por outro lado, o tempo de concentração/de resposta é teoricamente mais baixo numa bacia pequena do que numa bacia com uma área superior. Isto acontece, em primeiro lugar, porque a água que circula na bacia percorre um caminho mais curto, e depois porque o seu caudal responde mais depressa a variações nos quantitativos de precipitação (Booth, 1991; NOAA, 2010).

A forma das bacias de drenagem tem também uma influência nos hidrogramas de cheia, uma vez que, se uma bacia for alongada, o seu hidrograma será mais achatado do que se a bacia for arredondada (figura 4) (Lima J. e Lima I., 2010). Isto significa que, uma bacia com uma forma próxima de circular atinge caudais de ponta mais elevados e em menos tempo, comparativamente a uma bacia de forma oval. Esta situação sucede porque, numa bacia arredondada o escoamento proveniente de várias partes da bacia tende a chegar simultaneamente ao seu sector terminal, ao contrário do que sucede em bacias alongadas (Kochel, 1988; Ramos, 2005a; NOAA, 2010).



**Figura 4** – Influência da forma da bacia no hidrograma de cheia  
(adaptado de Lima J. e Lima I., 2010: p. 153)

Há ainda uma outra condição relativa às características geométricas das bacias hidrográficas que é preciso ter em conta, que é o facto de as pequenas bacias terem uma maior probabilidade de serem afectadas na sua totalidade por núcleos de precipitação intensa (NOAA, 2010; Lima J. e Lima I., 2010). Daqui resulta que a duração da precipitação intensa tem uma maior probabilidade de atingir ou ultrapassar o tempo de concentração da bacia, dado que, toda a bacia está a contribuir para o aumento do escoamento. De referir que, o maior grau de circularidade de uma bacia também lhe confere maiores probabilidades de ser

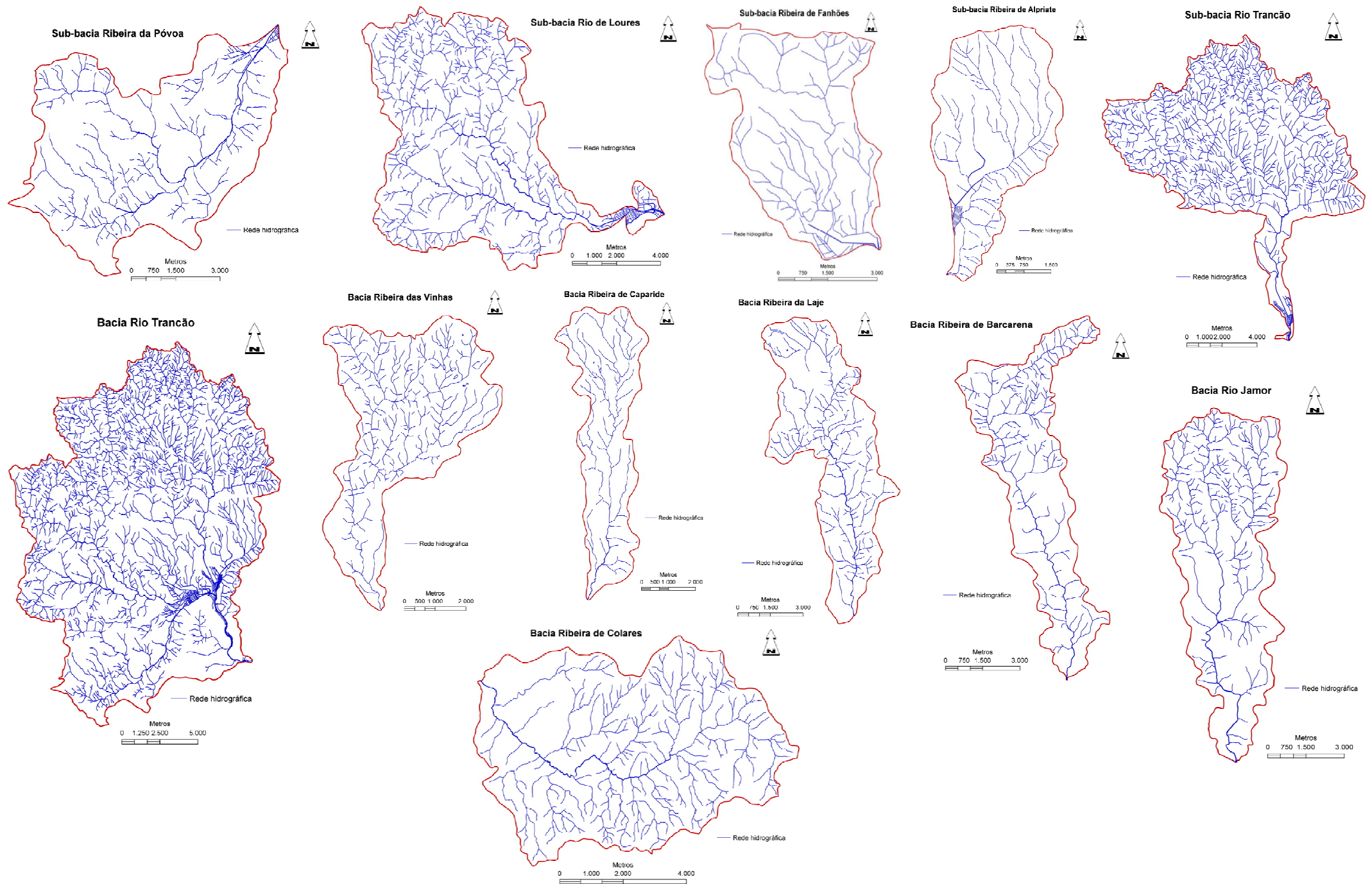
completamente coberta por estes núcleos de precipitação, porém, nestas situações, e em bacias de pequena dimensão, a forma acaba por não ser muito relevante.

Todas as bacias da AML Norte são consideradas pequenas, pois têm áreas entre as dezenas e as duas/três centenas de km<sup>2</sup> (Viessman *et al.* 1977). Assim, as suas áreas variam entre 17,3 km<sup>2</sup> da bacia da ribeira de Alpriate e 290,8 km<sup>2</sup> da bacia do rio Trancão (quadro 3). Quanto à forma, pode dizer-se que, à primeira vista, existem dois conjuntos de bacias hidrográficas distintos. Por um lado, as bacias arredondadas, compostas pela bacia da ribeira de Colares e pela bacia e respectivas sub-bacias do rio Trancão; por outro lado, as bacias alongadas, que drenam para Sul (Vinhas, Caparide, Laje, Barcarena e Jamor) (figuras 1 e 5). Os resultados dos parâmetros geométricos calculados são apresentados no quadro seguinte.

BACIAS HIDROGRÁFICAS	ÁREA (km <sup>2</sup> )	PERÍMETRO (km)	COMPRIMENTO DA BACIA (km)	FACTOR FORMA (HORTON)	ÍNDICE DE GRAVELIUS	ÍNDICE DE CIRCULARIDADE (MILLER)	ÍNDICE DE ALONGAMENTO (SCHUMM)
BARCARENA	34,5	42,9	14,5	0,16	2,04	0,24	0,46
CAPARIDE	20,5	28,5	11,0	0,17	1,76	0,32	0,46
COLARES	50,4	33,4	10,0	0,50	1,32	0,57	0,80
JAMOR	43,8	39,3	13,9	0,23	1,66	0,36	0,54
LAJE	41,7	39,7	13,2	0,24	1,72	0,33	0,55
VINHAS	27,3	30,2	9,3	0,31	1,62	0,38	0,63
ALPRIATE	17,3	19,7	7,5	0,31	1,33	0,56	0,63
FANHÕES	25,6	24,4	6,7	0,56	1,35	0,54	0,85
LOURES	81,3	55,1	14,4	0,39	1,71	0,34	0,71
PÓVOA	45,2	36,1	9,2	0,54	1,50	0,44	0,83
TRANCÃO (SB)	104,7	66,1	15,9	0,42	1,81	0,30	0,73
TRANCÃO (B)	290,8	95,0	20,3	0,70	1,56	0,41	0,95

**Quadro 3** – Resultados dos parâmetros referentes à geometria





**Figura 5** – Bacias hidrográficas e respectivas redes de drenagem

Para aferir se a percepção da forma das bacias tem uma correspondência directa com a sua susceptibilidade às cheias, recorreu-se ao método de combinação dos índices geométricos (quadro 3), que apresentou os resultados revelados no quadro 4.

GEOMETRIA		
POSICÃO	BACIA HIDROGRÁFICA	VALOR DO ÍNDICE
1º	COLARES	4,0
	FANHÕES	
3º	PÓVOA	3,8
4º	ALPRIATE	3,0
5º	LOURES	2,5
6º	TRANCÃO (SB)	2,3
	VINHAS	
8º	JAMOR	1,8
9º	LAJE	1,5
10º	CAPARIDE	1,3
11º	BARCARENA	1,0

**SUSCEPTIBILIDADE ÀS CHEIAS**

	MUITO ELEVADA
	ELEVADA
	MODERADA
	REDUZIDA
	MUITO REDUZIDA

**Quadro 4** – Susceptibilidade das bacias às cheias segundo o factor geometria

Através dos valores finais do índice geometria, expressos no quadro 4, foi possível estabelecer as cinco classes de susceptibilidade às cheias. É de ressaltar que a utilização de vários índices geométricos, em vez de apenas um, possibilitou uma maior diferenciação entre as bacias hidrográficas. Assim, o que o índice final permite compreender é que, tendo em conta a realidade da AML Norte, Colares, Fanhões e Póvoa são claramente as bacias mais susceptíveis às cheias, seguidas de Alpriate. Com uma susceptibilidade moderada, em face da sua forma, surgem Loures, Trancão (SB)<sup>6</sup> e Vinhas. Com uma susceptibilidade reduzida encontram-se Jamor e Laje. Por último, Caparide e Barcarena são muito pouco susceptíveis a serem afectadas por cheias de grande magnitude no que respeita à componente geometria.

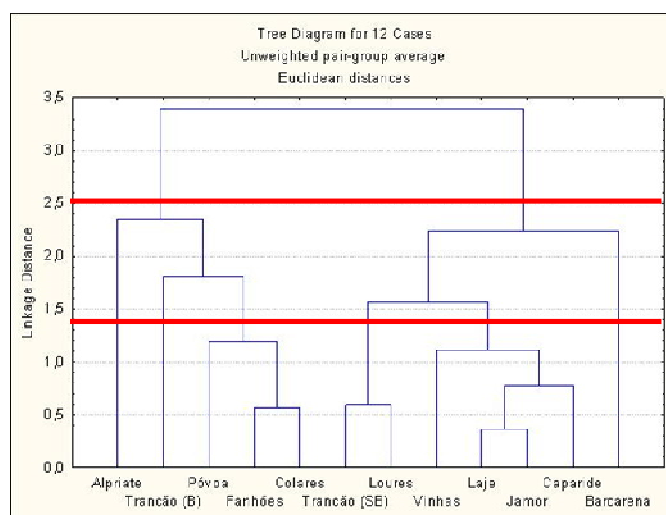
Importa ainda acrescentar três referências importantes: 1) a diferença que existe no grau de susceptibilidade às cheias entre Loures/Trancão (SB) e as primeiras classificadas do ranking, explica-se porque estas duas bacias são bastante mais estreitas nos seus sectores terminais (figura 5); 2) a bacia da ribeira das Vinhas, apesar de ser, à primeira vista, uma bacia alongada, apresenta uma susceptibilidade moderada. Este facto é explicado porque o seu

<sup>6</sup> Trancão (sub-bacia)

sector montante é substancialmente mais largo do que os seus sectores intermédio e jusante (figura 5); 3) embora sejam todas bacias alongadas, há diferenças entre as bacias do Jamor e da Laje e as bacias de Caparide e de Barcarena, que aliás estão expressas nos valores do índice final da geometria. É que Caparide e Barcarena são mais estreitas do que Jamor e Laje, o que as torna, para os índices de forma, mais longas (figura 5 e quadro 3). Mesmo entre as duas primeiras existe uma diferença, é que, apesar de terem larguras semelhantes, Barcarena é mais comprida do que Caparide (figuras 3 e 5).

Basicamente, esta classificação atribui susceptibilidades elevadas às bacias arredondadas, susceptibilidades baixas às bacias alongadas e susceptibilidades moderadas às bacias que, por uma razão ou por outra, não são nem alongadas nem arredondadas.

Esta realidade foi confirmada pela análise de clusters, cujo corte de hierarquia superior do dendograma confirma a separação das bacias de drenagem em dois grandes grupos: bacias com susceptibilidades elevadas a muito elevadas e bacias com susceptibilidades moderadas a muito reduzidas (figura 6). De referir que Trancão (B)<sup>7</sup> integra o grupo das bacias mais susceptíveis. No que diz respeito ao corte inferior do dendograma, a sua posição foi definida de modo a comprovar a separação entre Loures e Trancão (SB) e as outras bacias alongadas, uma vez que as suas características geométricas são diferentes (figura 6).



**Figura 6 – Análise de clusters (geometria)**

<sup>7</sup> Trancão (bacia)

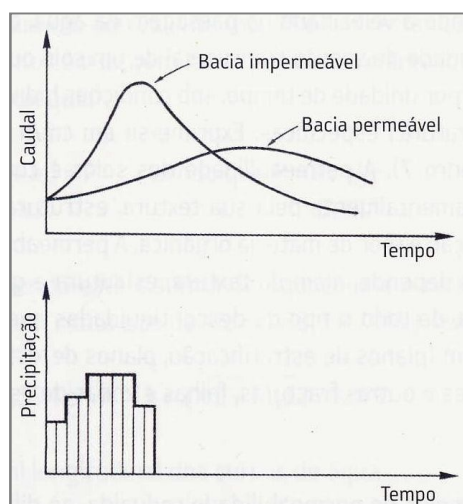
A principal diferença entre as duas metodologias utilizadas é que a análise de clusters sugere uma distância relativamente grande entre Barcarena e as bacias adjacentes, ao contrário do que acontece com a combinação dos índices de forma (apesar de ser a bacia menos susceptível às cheias) (quadro 4 e figura 6).

Desta forma, e em igualdade dos restantes factores, são as bacias hidrográficas de Colares, Fanhões e Póvoa que possuem maior susceptibilidade às cheias rápidas e são as bacias do Jamor, Caparide, Laje e Barcarena que estão na situação oposta. Porém, é importante não esquecer que são as bacias maiores que são capazes de gerar, em termos absolutos, valores de caudal mais elevados.

## **1.2. SUBSTRATO GEOLÓGICO**

Quando se analisa o substrato geológico no âmbito de um estudo sobre cheias, interessa conhecer fundamentalmente a sua permeabilidade, dado que a infiltração depende maioritariamente das características intrínsecas das rochas (Reis, 2006).

Como afirmam Lencastre e Franco (2006), existe uma importante interacção entre a constituição geológica de uma bacia hidrográfica e a distribuição e o movimento da água na mesma. Pode dizer-se então que o substrato é o factor que mais condiciona o tipo de escoamento (superficial, sub-superficial ou subterrâneo), quando os solos são pouco espessos. Em bacias pouco permeáveis predomina o escoamento superficial, fazendo aumentar a densidade da rede hidrográfica e intensificar os caudais de ponta (Ramos, 2005a). Como os valores de escoamento aumentam, os seus efeitos também são amplificados. Ou seja, o incremento dos caudais conduz a maiores fenómenos de erosão e, consequentemente, a maiores cargas sólidas transportadas pelos cursos de água em situações de cheia (Ramos, 2009). Para além disso, um substrato praticamente impermeável reduz o tempo que água demora a chegar aos fundos de vale, logo, para além dos caudais de ponta serem mais elevados, também ocorrem mais cedo (figura 7). Por outro lado, em bacias muito permeáveis é facilitada a infiltração, prevalecendo o escoamento sub-superficial ou subterrâneo, tornando essas bacias muito menos perigosas em episódios de precipitação intensa (Smith e Ward, 1998; Ramos, 2005a).



**Figura 7** – Influência da permeabilidade da zona vadosa no hidrograma de cheia (*in* Ramos, 2009: p. 42)

Na Península de Lisboa existe uma grande diversidade litológica, pois observam-se tanto rochas sedimentares (arenitos, margas e calcários), como magmáticas, que compõem o maciço de Sintra (granitos, sienitos, dioritos e gabros) e o Complexo Vulcânico de Lisboa (figura 8) (Ramos-Pereira, 2003). Logo, se a natureza das rochas é diferente, também a sua permeabilidade será distinta. Se as rochas sedimentares são relativamente permeáveis, exceção feita às rochas argilosas e margosas, já no caso das que compõem a serra de Sintra e o Complexo Vulcânico de Lisboa, a situação é bastante diferente (quadro 5). Como tal, a localização das bacias hidrográficas na Península de Lisboa faz toda a diferença no que diz respeito à permeabilidade da sua zona vadosa (figuras 3 e 9). Teoricamente, são as bacias constituídas, em grande parte das suas áreas, por materiais do Complexo Vulcânico de Lisboa e do maciço de Sintra que têm valores de permeabilidade mais baixos (figura 8 e quadro 6). No entanto, a serra de Sintra acaba por ter uma importância menor no contexto da região, pois as rochas plutónicas que a compõem ocupam uma porção de território bastante inferior à que é ocupada pelo Complexo Vulcânico de Lisboa (figura 8).

<b>FORMAÇÕES GEOLÓGICAS</b>	<b>VALOR PERMEABILIDADE</b>
Planos de água	0
Aterros	5
Aluviões	3, 6 ou 9*
Areias de praia	8
Dunas	8
Areias e cascalheiras de génese indiferenciada	6
Depósitos de terraços fluviais	6
Depósitos de terraços marinhos	6
Formação das Argilas de Forno do Tijolo	3
Formação das Argilas de Xabregas	3
Formação das Argilas dos Prazeres	3
Formação das Areias com Placunamioecénica	7
Formação das Areias de Quinta do Bacalhau	7
Formação das Areias de Vale de Chelas	7
Formação das Areolas de Braço de Prata	6
Formação das Areolas de Cabo Ruivo	6
Formação das Areolas de Estefânia	6
Formação dos Calcários de Casal Vistoso	6
Formação dos Calcários de Entre-Campos	6
Formação dos Calcários de Marvila	6
Formação dos Calcários de Musgueira	6
Formação dos Calcários de Quinta das Conchas	6
Formação dos Grés dos Grilos	5
Formação de Benfica: intercalações calcárias (Calcários de Alforneiros)	5
Formação de Benfica: conglomerados, arenitos e argilitos	4
Complexo Vulcânico de Lisboa	2
Conglomerados de Fanhões	5
Formação de Bica: calcários com rudistas	6
Formação de Caneças: calcários e arenitos	5
Formação de Rodízio: pelitos, arenitos e conglomerados	5
Formação de Cresmina: calcários e margas	4
Formação de Regatão: arenitos, pelitos e dolomitos	5
Formação de Fonte Grada: arenitos, conglomerados e pelitos	5
Formações de Ribamar e de Ribeira de Ilhas: calcários, arenitos e pelitos	5
Formações de Cabo Raso e de Guincho: calcários recifais e calcários com Chofatellas	6
Formação de Maceira: margas e calcários	3
Formações de Santa Susana e de Praia dos Coxos: margas, arenitos, calcários e pelitos	3
Formações de Serradão e de Guia: calcários, margas e arenitos	4
Formação de Vale de Lobos: arenitos, conglomerados e pelitos	5
Formação de Porto da Calada: arenitos, pelitos, calcários e dolomitos	4
Formação de Serreira: pelitos, arenitos e conglomerados	4
Formação de Farta Pão: calcários e margas	6
Formação de Freixial: arenitos, margas e calcários	4
Formação de Arranhó: calcários e margas	4
Formação de Sobral: pelitos, arenitos, margas e calcários	4
Formação de Amaral: calcários	5
Formação de Mem Martins: calcários e margas	6
Formação de Ramalhão: calcários e margas	4
Formação de S. Pedro: calcários e margas	4
Calcários de Ota	6
Sienito de Sintra	2
Granito de Sintra	2
Gabro-diorito de Malveira e Carnaxide	3
Mafrãos	2
Rochas vulcânicas indiferenciadas	2
Rochas piroclásticas	2
Filões e massas de rochas vulcânicas	2

**Quadro 5** – Valor de permeabilidade das formações geológicas que compõem as bacias estudadas



BACIAS HIDROGRÁFICAS	ÁREAS DE PERMEABILIDADE REDUZIDA OU MUITO REDUZIDA (%)	ÁREAS DE PERMEABILIDADE ELEVADA OU MUITO ELEVADA (%)	PERMEABILIDADE MÉDIA
BARCARENA	53,8	19,9	4,05
CAPARIDE	36,4	29,7	4,66
COLARES	44,2	24,9	4,56
JAMOR	49,9	24,1	3,96
LAJE	24,5	36,8	4,79
VINHAS	57,8	30,4	3,92
ALPRIATE	61,4	25,3	4,16
FANHÕES	65,6	13,2	3,43
LOURES	52,9	6,1	3,79
PÓVOA	70,2	17,8	3,70
TRANCÃO (SB)	84,6	6,4	4,20
TRANCÃO (B)	62,1	18,0	4,15

**Quadro 6** - Resultados dos parâmetros referentes ao substrato geológico

Para se conhecer a susceptibilidade das bacias hidrográficas às cheias foram combinados os índices referentes ao substrato geológico. O quadro 7 mostra os resultados obtidos.

SUBSTRATO GEOLÓGICO		
POSIÇÃO	BACIA HIDROGRÁFICA	VALOR DO ÍNDICE
1º	FANHÕES	3,7
	PÓVOA	
3º	TRANCÃO (SB)	3,3
4º	LOURES	3,0
5º	BARCARENA	2,7
6º	ALPRIATE	2,3
	JAMOR	
	VINHAS	
9º	COLARES	1,7
10º	CAPARIDE	1,0
	LAJE	

**SUSCEPTIBILIDADE ÀS CHEIAS**

- MUITO ELEVADA
- ELEVADA
- MODERADA
- REDUZIDA
- MUITO REDUZIDA

**Quadro 7** - Susceptibilidade das bacias às cheias segundo o factor substrato geológico

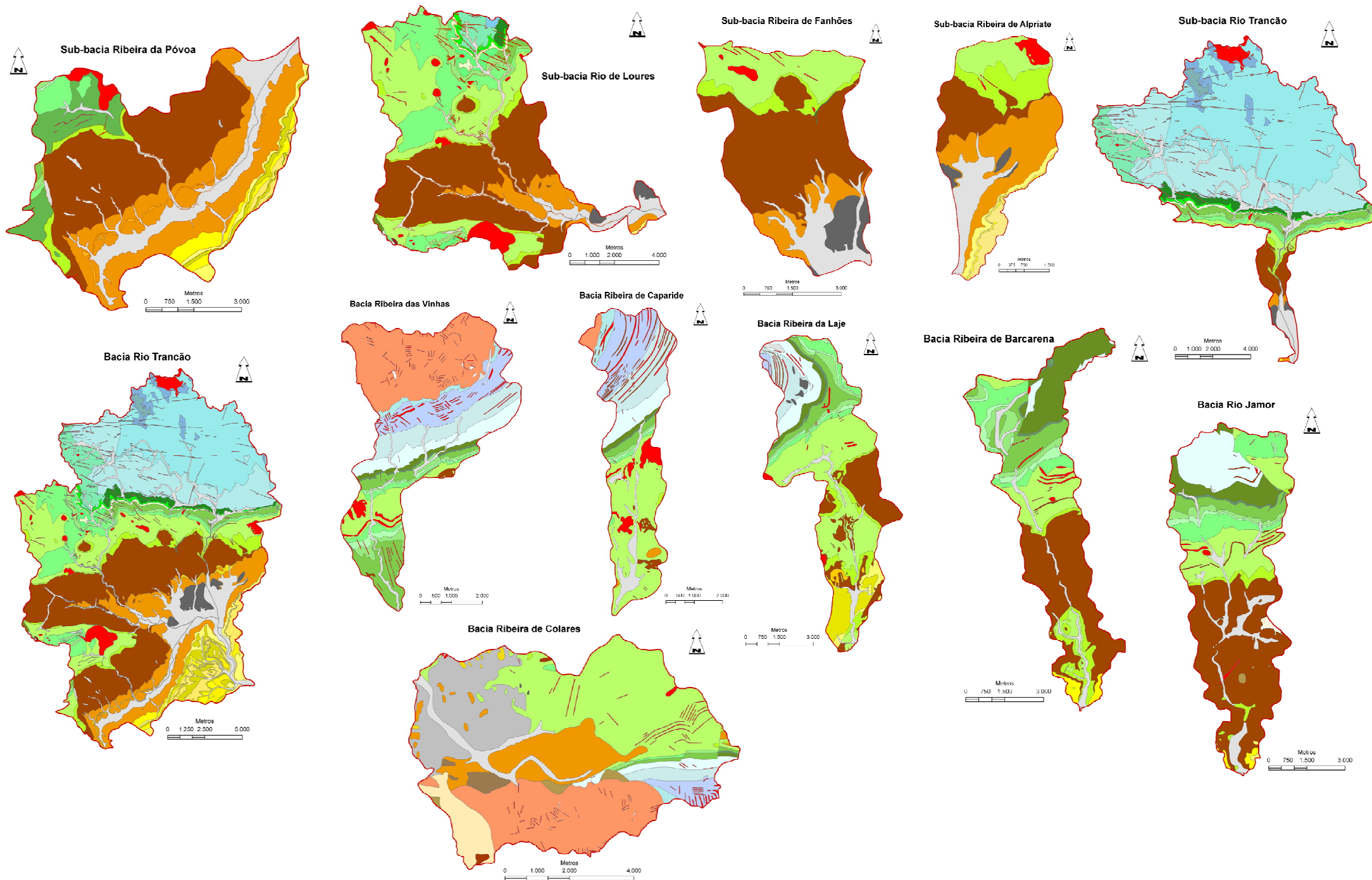
Segundo o quadro 7, é possível constatar que as bacias que possuem susceptibilidades muito elevadas são Fanhões, Póvoa e Trancão (SB). As duas primeiras são formadas, em grande parte, por materiais do Complexo Vulcânico de Lisboa e pelas aluviões argilosas da

depressão de Loures, e têm, por isso, valores médios de permeabilidade baixos (figura 9). Quanto a Trancão (SB), desenvolve-se, em quase toda a sua extensão, sobre formações de carácter sedimentar, mas essas formações possuem rochas margosas na sua composição, o que significa que as permeabilidades são baixas (figuras 8 e 9). Importa realçar que Fanhões e Póvoa têm um valor superior do factor substrato, e, como consequência, são consideradas mais susceptíveis às cheias do que Trancão (SB) (quadro 7). Isto sucede, porque a permeabilidade média desta bacia (4,20) é mais elevada do que a de Fanhões e Póvoa (3,43 e 3,70 respectivamente). Esta situação é o reflexo do tipo de rochas que a compõem (formações sedimentares, na maioria, de baixa permeabilidade), em contraponto aos materiais do Complexo Vulcânico de Lisboa existentes nas outras duas bacias.

A classe seguinte engloba Loures e Barcarena, que são bacias com áreas relativamente extensas ocupadas pelo Complexo Vulcânico de Lisboa, embora não tão extensas como acontece nas três primeiras colocadas do ranking (figura 8). Pode dizer-se igualmente, com recurso ao valor do índice (quadro 7), que a realidade de Loures está mais próxima de Fanhões, Póvoa e Trancão, e que a situação de Barcarena é mais próxima à das bacias com susceptibilidades moderadas. Aliás, Barcarena e Jamor são muito semelhantes em termos de substrato geológico, porque estão praticamente “divididas” em dois sectores distintos: o sector Norte que apresenta permeabilidades médias e elevadas (rochas sedimentares) e o sector Sul constituído por terrenos do Complexo Vulcânico de Lisboa (permeabilidade muito baixa) (figura 9). As dissemelhanças entre elas residem no facto de a primeira ter maior superfície ocupada por formações de permeabilidade baixa e ter menor superfície ocupada por formações de permeabilidade elevada, apesar de serem diferenças pequenas.

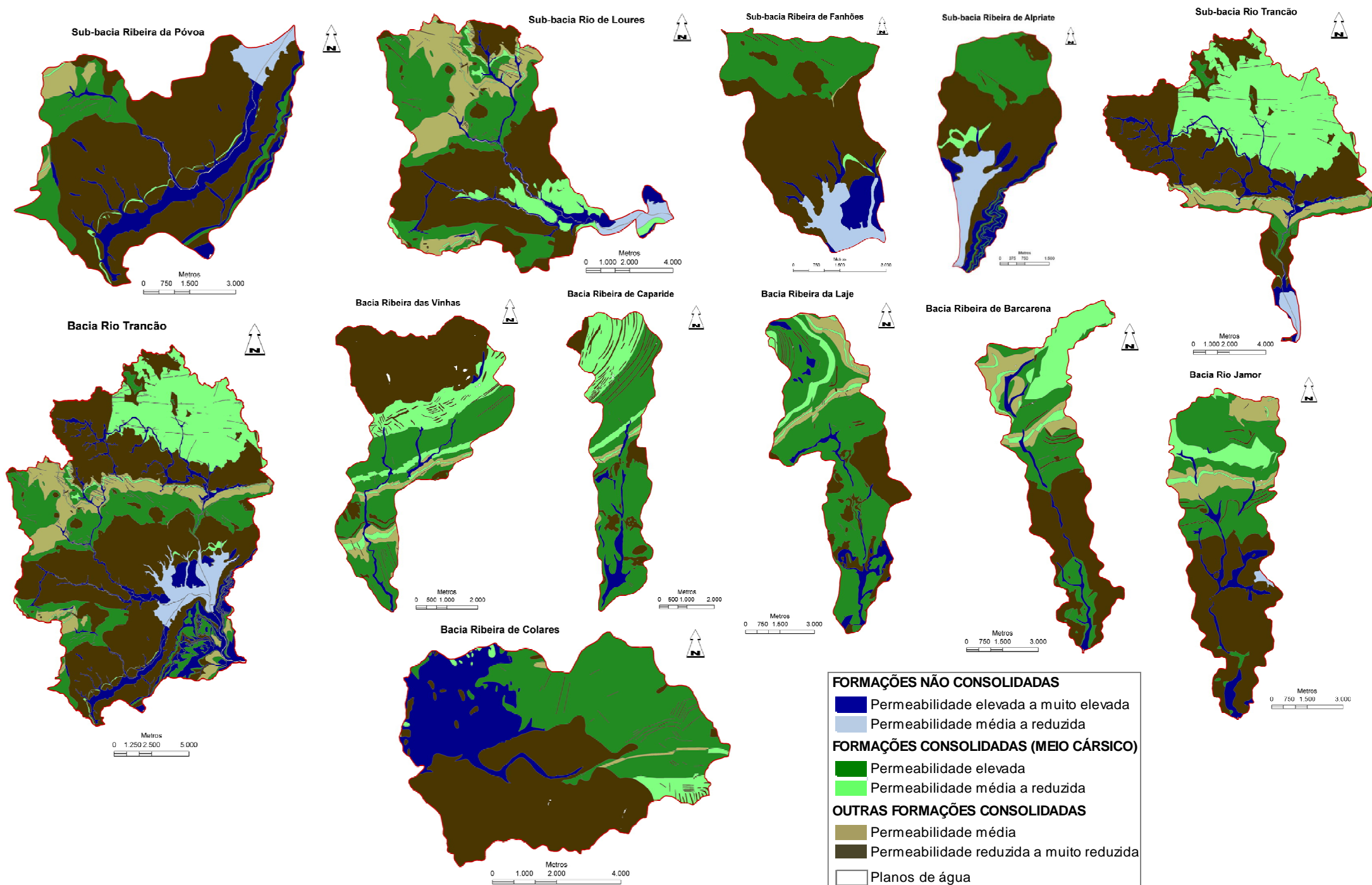
Com valores finais de susceptibilidade moderados surgem, para além de Jamor, Alpriate e Vinhas. Quanto a Alpriate, apesar de possuir boa parte da sua área formada pelo Complexo Vulcânico de Lisboa, pelas aluviões da depressão de Loures e pela própria formação de Benfica (permeabilidade baixa), tem também formações com permeabilidades elevadas (areias, areolas e outras formações de origem sedimentar) (figura 9). Já a bacia da ribeira das Vinhas tem, no seu sector montante, um substrato geológico de baixa e muito baixa permeabilidade (granitos de Sintra e calcários e margas – formação de Ramalhão), mas, a restante bacia é constituída por formações de permeabilidades médias e elevadas (figura 9).





**Figura 8 – Geologia das bacias hidrográficas**

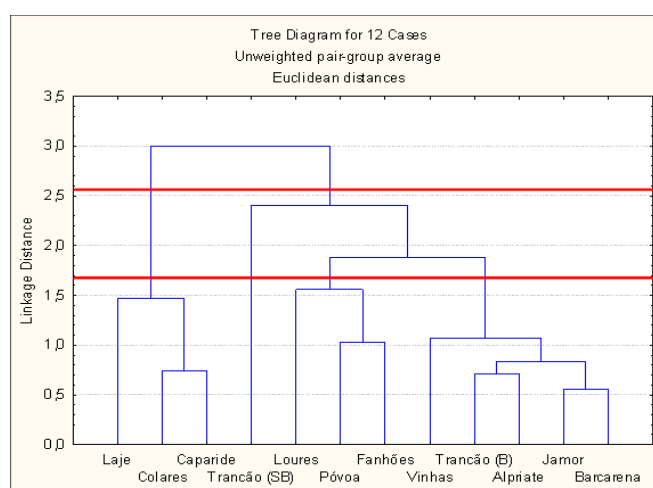
		<div>Planos de água</div> <div>Aterros</div>
QUATERNÁRIO	HOLOCÉNICO	<div>Aluviões</div> <div>Areias de praia</div> <div>Dunas</div>
	PLISTOCÉNICO	<div>Areias e cascalheiras de génese indiferenciada</div> <div>Depósitos de terraços fluviais</div> <div>Depósitos de terraços marinhos</div>
TERCIÁRIO	MIOCÉNICO	<div>Argilas</div> <div>Areias</div> <div>Areolas</div> <div>Formação dos Grés dos Grilos</div> <div>Calcários</div>
	EOCÉNICO A OLIGOCÉNICO	<div>Formação de Benfica: intercalações calcárias</div> <div>Formação de Benfica: conglomerados, arenitos e argilitos</div>
SECUNDÁRIO	CRETÁCICO	<div>Complexo Vulcânico de Lisboa</div> <div>Conglomerados de Fanhões</div> <div>Formação de Bica: calcários com rudistas</div> <div>Formação de Caneças: calcários e arenitos</div> <div>Formação de Rodízio: pelitos, arenitos e conglomerados</div> <div>Formação de Cresmina: calcários e margas</div> <div>Formação de Regatão: arenitos, pelitos e dolomitos</div> <div>Formação de Fonte Grada: arenitos, conglomerados e pelitos</div> <div>Formações de Ribamar e de Ribeira de Ilhas indiferenciadas: calcários, arenitos e pelitos</div> <div>Formações de Cabo Raso e de Guincho: calcários recifais e calcários com Chofatellas</div> <div>Formação de Maceira: margas e calcários</div> <div>Formações de Santa Susana e da Praia dos Coxos: margas, arenitos, calcários e pelitos</div> <div>Formações de Serradão e da Guia: calcários, margas e arenitos</div> <div>Formação de Vale de Lobos: arenitos, conglomerados e pelitos</div> <div>Formação de Porto da Calada: arenitos, pelitos, calcários e dolomitos</div> <div>Formação de Serreira: pelitos, arenitos e conglomerados</div>
	JURÁSSICO	<div>Formação de Farta Pão: calcários e margas</div> <div>Formação de Freixial: arenitos, margas e calcários</div> <div>Formação de Arranhó: calcários e margas</div> <div>Formação de Sobral: pelitos, arenitos, margas e calcários</div> <div>Formação de Amaral: calcários</div> <div>Formação de Mem Martins: calcários e margas</div> <div>Formação de Ramalhão: calcários e margas</div> <div>Formação de S. Pedro: calcários e margas</div> <div>Calcários de Ota</div>
ROCHAS MAGMÁTICAS		<div>Sienitos</div> <div>Granitos</div> <div>Gabro-dioritos</div> <div>Mafraítos</div> <div>Outras rochas vulcânicas</div> <div>Filões e massas de rochas vulcânicas</div>



**Figura 9 – Permeabilidade das bacias hidrográficas**

Para terminar, surgem Colares, com uma reduzida susceptibilidade, e Caparide e Laje, com susceptibilidades muito reduzidas. Em relação às duas últimas bacias, estas possuem um substrato geológico formado predominantemente por rochas sedimentares (calcários, arenitos, margas e conglomerados) que, no geral, apresentam permeabilidades médias e elevadas (figura 9). O caso de Colares é um pouco diferente, já que se verifica, no que respeita às características das rochas, uma dissimetria clara entre as duas margens do curso de água principal. A margem esquerda é composta quase exclusivamente por granitos e sienitos (permeabilidade muito reduzida), enquanto a margem direita possui uma extensa área de calcários e arenitos (permeabilidade elevada) (figura 8). Assim sendo, a margem esquerda desta bacia é substancialmente mais susceptível às cheias do que a margem oposta. Por outro lado, a parte jusante desta bacia é composta por dunas (permeabilidade muito elevada) (figura 8). Ora, a existência das dunas, dos calcários e dos arenitos fazem com que o grau de permeabilidade da bacia, em termos gerais, não seja mais baixo.

Para testar os resultados da metodologia anterior recorreu-se à análise de clusters, que acabou por validar as conclusões alcançadas, apenas com algumas excepções. O corte de hierarquia superior na figura 10 possibilita a separação das bacias com susceptibilidades reduzidas e muito reduzidas (Colares, Caparide e Laje) e todas as outras. Quanto ao corte inferior do dendograma, permite distinguir três grupos de bacias: 1) de susceptibilidade reduzida e muito reduzida; 2) de susceptibilidade elevada e muito elevada (Loures, Póvoa e Fanhões); 3) de susceptibilidade moderada (Vinhas, Alpriate e Jamor).



**Figura 10** – Análise de clusters (substrato geológico)

As excepções relativamente ao método de combinação de índices são Barcarena/Loures e Trancão (SB). A primeira acaba por ser uma variação, mais do que uma excepção, já que Barcarena reforça o grupo das bacias com susceptibilidade moderada, confirmando a sua proximidade a Jamor, enquanto Loures integra o grupo das bacias mais susceptíveis. Esta situação também se reflectia um pouco no método anterior, pois apesar de estarem na mesma classe (susceptibilidade elevada), já se notavam as diferenças entre as duas. Trancão (SB), embora seja considerada uma bacia com uma susceptibilidade às cheias muito elevada, na análise de clusters ela só se junta às restantes bacias depois de todas as uniões estarem feitas (exceptuando Laje, Colares e Caparide). Isto acontece porque esta bacia tem, como já foi dito, características algo diferentes das outras. Por último, resta acrescentar que Trancão (B) está inserido no grupo das bacias com susceptibilidades moderadas, pois reflecte as características de todas as suas sub-bacias e do seu sector terminal, talhado maioritariamente em calcários, areias e areolas (permeabilidades elevadas) (figuras 8 e 9).

Concluindo, são as bacias de Fanhões, Póvoa e Trancão (SB) que são capazes de gerar um maior escoamento superficial, enquanto as bacias de Colares, Caparide e Laje são as que, potencialmente, menor escoamento superficial produzem, sendo, por isso, as menos perigosas em situações de cheia, quanto ao substrato geológico. No entanto, é importante não esquecer que estas bacias não são uniformes em termos de subsolo/permeabilidade e que o valor final de susceptibilidade (quadro 7) é um valor médio para toda a bacia. Se numa bacia existem secções com permeabilidades distintas, também a densidade de drenagem/hídrica varia. Isto significa que existem sectores das bacias com comportamentos diferentes em situações de cheia. Por outro lado, uma formação litológica pode não ter as mesmas características em toda a sua extensão, logo, dentro da mesma formação, existem áreas com graus de permeabilidade desiguais e que, portanto, respondem de forma diferente aos episódios de precipitação intensa.

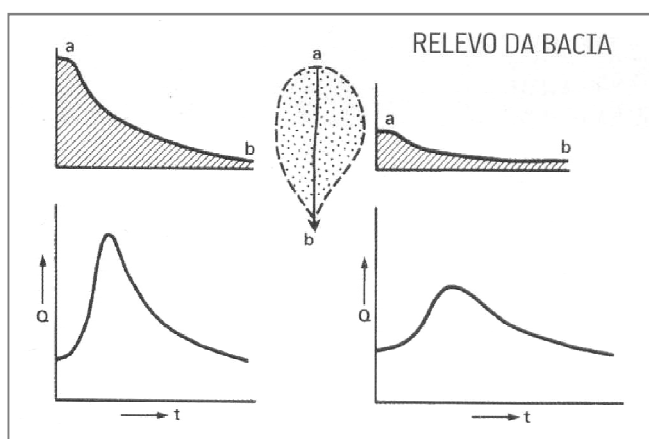
### **1.3. RELEVO**

Como afirma Ramos (2009), o relevo tem uma influência determinante no comportamento das bacias hidrográficas em situações de cheia. Normalmente, os seus elementos mais relevantes são: a posição relativa das serras/montanhas, a exposição aos fluxos pluviogénicos, a altitude, o desnível e o declive (Ramos, 2009). No entanto, na AML Norte, este factor não é tão determinante como em outras regiões do país, uma vez que o relevo não é particularmente vigoroso. Se exceptuarmos o caso da serra de Sintra, não se pode dizer que o relevo tenha influência na distribuição da precipitação na Península de Lisboa. Para além disto, o relevo pode impor alguns condicionalismos ao padrão da rede de



drenagem. Esses condicionalismos resultam, nomeadamente, da existência de relevos de costeira, que dão origem a cursos de água ortoclinais, cataclinais e anaclinais (por exemplo na bacia da ribeira da Póvoa).

Todavia, de todos os elementos do relevo, acaba por ser o declive que maior preponderância tem em situações de cheia. Desta forma, quanto maior for a inclinação das vertentes e dos canais fluviais: 1) menor será a infiltração; 2) menor será o tempo que a água demora a concentrar-se nos leitos fluviais; 3) maior será a velocidade do escoamento; 4) maiores serão os caudais de ponta; 5) maior será a energia potencial do escoamento; 6) maior será a erosão hídrica e fluvial; 7) maior será o transporte de sedimentos (Ramos, 1994; Lencastre e Franco, 2006; Ramos, 2009; NOAA, 2010; Lima J. e Lima I., 2010). Portanto, maiores declives resultam em caudais de ponta de maior magnitude e que ocorrem mais cedo (figura 11).



**Figura 11** – Influência do relevo no hidrograma de cheia  
(in Ramos, 2009: p. 96)

Como não é um território muito acidentado, a única área que se destaca na AML Norte em termos de relevo é a serra de Sintra. Por isso, é nas bacias hidrográficas que drenam a partir da serra (Colares, Vinhas e Caparide) que se verificam os maiores desníveis altitudinais (superiores a 500 metros) (figura 12). Também a presença do maciço de Sintra se nota nos declives existentes no sector montante das bacias de drenagem das ribeiras das Vinhas e de Caparide, assim como na margem esquerda da bacia da ribeira de Colares (figura 13). Nesta figura observam-se igualmente as costeiras de Lousa-Bucelas (bacia do rio Trancão) e de Odivelas-Vialonga (bacia da ribeira da Póvoa).

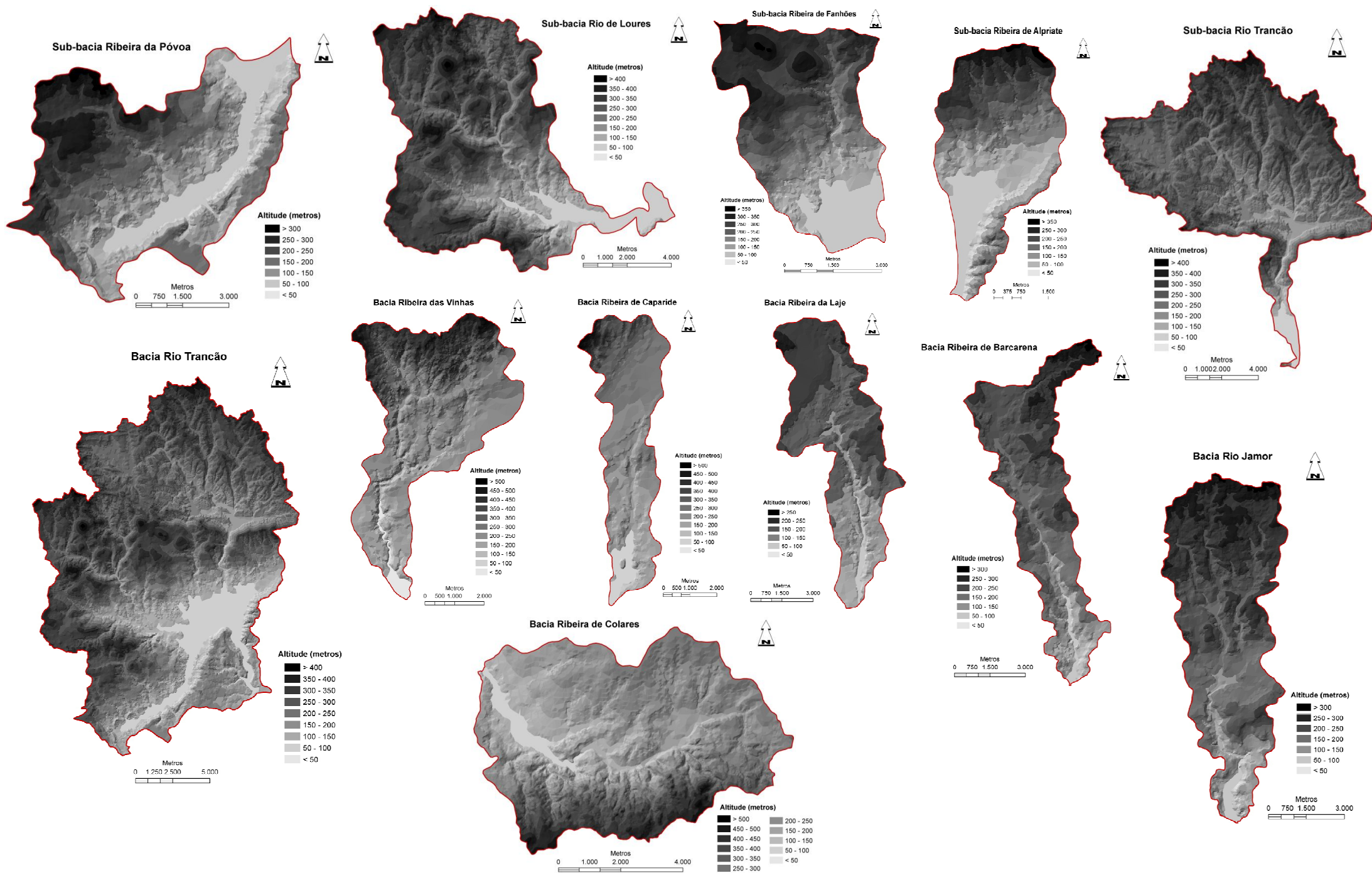
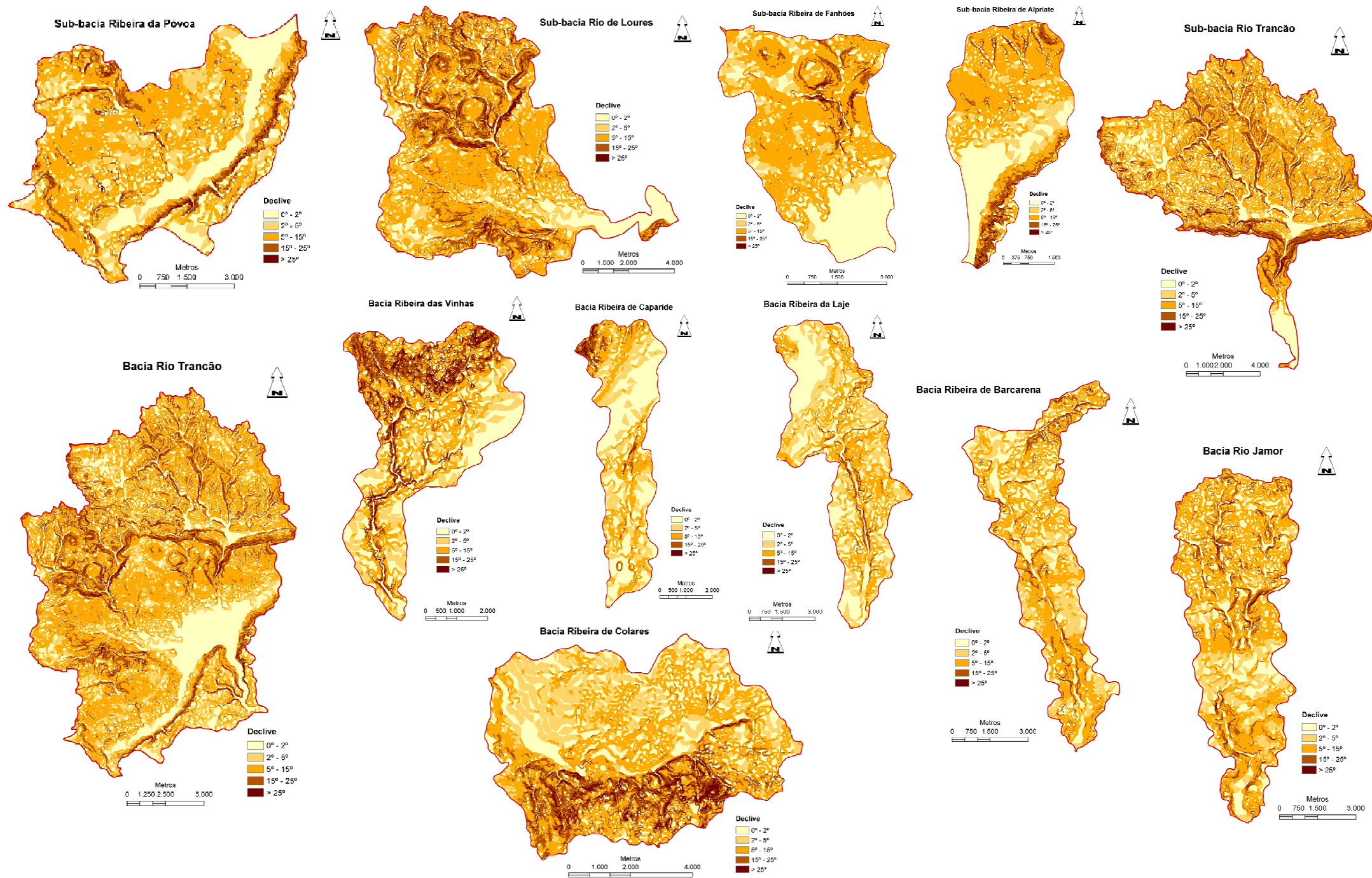


Figura 12 – Relevo das bacias hidrográficas





**Figura 13 – Declives das bacias hidrográficas**







De seguida passa-se à análise da susceptibilidade das bacias de drenagem às cheias, baseada nos índices de relevo calculados (quadro 8). Pode observar-se a classificação no quadro 9.

BACIAS HIDROGRÁFICAS	Altitude mínima da bacia (metros)	Altitude máxima da bacia (metros)	Altitude média da bacia (metros)	Altura média da bacia (metros)	Amplitude altimétrica (metros)	Comprimento rectângulo equivalente da bacia (km)	Inclinação média do curso de água principal (metros/km)	Coefficiente Orográfico (Fourier)	Índice de Rugosidade (Melton)	Relação de Relevo (Schumm)	Índice de Declive de Roche (metros/km)
BARCARENA	0	328	157	157	328	19,6	15,1	714	925	0,019	16,7
CAPARIDE	0	528	144	144	528	12,6	18,4	1012	1526	0,048	42,0
COLARES	0	528	156	156	528	12,8	16,2	483	1732	0,042	41,4
JAMOR	0	343	172	172	343	17,0	18,8	675	1008	0,025	20,2
LAJE	0	262	125	125	262	17,4	14,3	374	723	0,018	15,1
VINHAS	0	528	172	172	528	13,0	32,8	1085	2059	0,055	40,7
ALPRIATE	0	351	104	104	351	7,6	32,7	626	1151	0,045	46,3
FANHÕES	1	409	154	153	408	9,5	27,6	915	1049	0,055	43,1
LOURES	0	431	202	202	431	24,1	17,2	502	1332	0,024	17,9
PÓVOA	2	353	117	115	351	14,8	16,7	285	870	0,027	23,7
TRANCÃO (SB)	0	442	203	203	442	29,4	10,5	394	1812	0,021	15,0
TRANCÃO (B)	0	442	172	172	442	40,2	8,7	101	1437	0,017	11,0

**Quadro 8** - Resultados dos parâmetros referentes ao relevo

RELEVO		
POSIÇÃO	BACIA HIDROGRÁFICA	VALOR DO ÍNDICE
1º	VINHAS	4,0
2º	CAPARIDE	3,4
	FANHÕES	
4º	ALPRIATE	3,0
5º	COLARES	2,8
6º	LOURES	1,6
	PÓVOA	
	TRANCÃO (SB)	
9º	BARCARENA	1,4
	JAMOR	
11º	LAJE	1,0

**SUSCEPTIBILIDADE ÀS CHEIAS**

 MUITO ELEVADA  
 ELEVADA  
 MODERADA  
 MUITO REDUZIDA

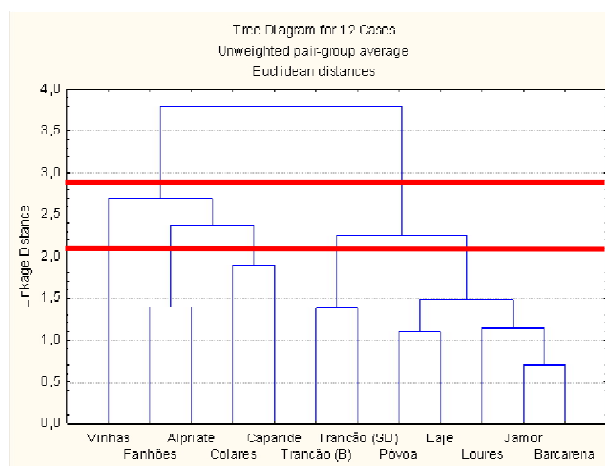
**Quadro 9** - Susceptibilidade das bacias às cheias segundo o factor relevo

A classificação da susceptibilidade comprova a existência de duas realidades completamente distintas. Existem cinco bacias (Vinhas, Caparide, Fanhões, Alpriate e Colares) que se destacam das restantes (quadro 9). Assim, às três bacias que escoam a partir do maciço de Sintra, juntam-se Fanhões e Alpriate. Esta situação explica-se porque estas duas bacias se localizam no reverso da costeira Lousa-Bucelas, apresentando amplitudes altimétricas significativas tendo em conta a sua reduzida dimensão (quadro 8). Contudo, apresentam graus de susceptibilidade diferentes às cheias. Desta forma, a única que possui uma susceptibilidade muito elevada é Vinhas, à qual se seguem Caparide e Fanhões com susceptibilidades elevadas, e depois Alpriate e Colares com susceptibilidades moderadas. Apesar de tudo, é Vinhas que mais se distingue dentro destas cinco bacias, porque possui um comprimento reduzido e uma amplitude altimétrica bastante significativa (quadro 8). Daqui resultam, por isso, valores de declive muito acentuados, o que exponencia a velocidade e a magnitude dos caudais de ponta de cheia.

As restantes seis bacias (Loures, Póvoa, Trancão (SB), Barcarena, Jamor e Laje) estão classificadas como tendo susceptibilidades muito reduzidas. E, como se vê no quadro 9, a distância entre os dois grupos é de tal forma acentuada, que não existem bacias na classe de susceptibilidade reduzida.

Ainda relativamente a estas bacias, o ranking atribuiu um valor um pouco mais elevado a Loures, Póvoa e Trancão (SB), comparativamente a Barcarena, a Jamor e, sobretudo a Laje, que ocupa o último lugar desta classificação (quadro 9).

A análise de clusters (figura 14) comprova a existência das duas realidades identificadas através do método da combinação de índices. Pode ver-se, no dendograma, que o corte superior estabelece esses dois grandes agrupamentos.



**Figura 14** – Análise de clusters (relevo)

Se o dendograma for “partido” pelo corte inferior, pode fazer-se uma análise mais detalhada das relações entre as bacias. No primeiro grupo, as relações estabelecem-se por proximidade, isto é, Fanhões junta-se a Alpriate, e Colares associa-se a Caparide. Esta é uma situação distinta face ao que se observa no quadro 9, uma vez que Fanhões está mais próximo de Caparide, e Colares de Alpriate. Quanto a Vinhas, é a última bacia a juntar-se ao grupo, já depois deste corte no dendograma, o que confirma que é a mais susceptível às cheias das cinco.

No segundo agrupamento observam-se dois subgrupos. A sub-bacia do Trancão tem características de relevo semelhantes à bacia principal e, por isso, associam-se, enquanto as outras cinco bacias formam um subgrupo mais alargado. O facto de Trancão não se agrupar com as outras bacias logo no primeiro nível é explicado pelo resultado diferente do índice de rugosidade, e também porque a inclinação média do seu curso de água principal é menor comparativamente às outras bacias do grupo (quadro 8). Pode ainda observar-se que, ao contrário da outra metodologia empregue, Póvoa está mais próxima de Laje, e Loures de Jamor e Barcarena. Estas junções fazem-se deste modo devido aos resultados do coeficiente orográfico e do índice de rugosidade (quadro 8).

Em resumo, são as bacias das ribeiras das Vinhas, de Caparide e de Fanhões, as mais susceptíveis em episódios de elevadas precipitações, sendo Barcarena, Jamor e Laje, as menos susceptíveis.

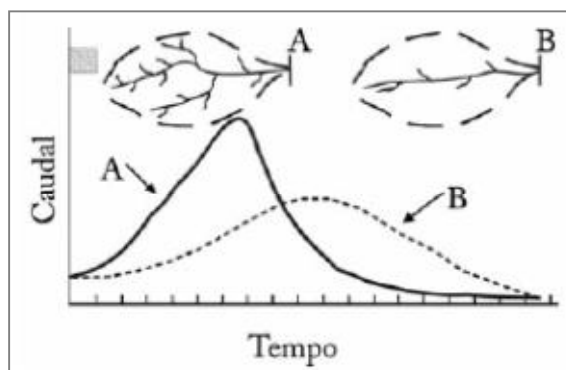
#### **1.4. REDE DE DRENAGEM**

A densidade da rede de drenagem de qualquer bacia hidrográfica depende, como já foi dito, da permeabilidade da mesma, que resulta, principalmente, das características do subsolo, mas também, da topografia, do solo e do coberto vegetal (Leopold, 1968; Reis, 2006).

Assim, se uma bacia tiver um substrato pouco permeável, é provável que tenha uma elevada densidade de drenagem. Por outro lado, um substrato bastante permeável deverá resultar numa drenagem dispersa e pouco eficiente. Contudo, se uma bacia bastante permeável nunca dará origem a uma rede com uma densidade elevada, já numa bacia praticamente impermeável não é um dado adquirido que a rede seja densa.

Uma drenagem eficiente implica uma elevada densidade da rede, e significa que existe uma rápida concentração da água proveniente da precipitação nos talwegues, já que o seu percurso sobre as vertentes é curto (Reis, 2006; NOAA, 2010; Lima J. e Lima I., 2010). Por sua vez, é quando chega aos canais fluviais que água atinge as maiores velocidades, fazendo com que, em bacias com redes de drenagem densas, os caudais de ponta sejam mais elevados

e ocorram mais cedo do que em bacias com redes menos densas (figura 15) (Reis, 2006; NOAA, 2010). Ora, se as velocidades do escoamento são maiores, logo, a erosão fluvial e o transporte de sedimentos também o serão, aumentando a perigosidade das cheias (Ramos, 1994; Eze e Efiog, 2010).



**Figura 15** – Influência da rede de drenagem no hidrograma de cheia  
(in Lima J. e Lima I., 2010: p. 154)

Portanto, maiores densidades de drenagem originam: 1) caudais de ponta de maior magnitude; 2) caudais de ponta que ocorrem mais cedo (as cheias formam-se mais depressa); 3) mais erosão fluvial e maior capacidade de transporte de sedimentos. Daqui resulta que, em igualdade das restantes componentes físicas, quanto mais densa e eficiente for a drenagem de uma bacia, maior será a sua susceptibilidade às cheias.

Como já se disse, as bacias hidrográficas que drenam a Península de Lisboa são de pequena dimensão, o que se reflecte nas suas hierarquias e magnitudes. Assim, a maior bacia, Trancão (B), tem uma hierarquia de 7 e uma magnitude de 1411, enquanto a hierarquia das restantes varia entre 4 e 6 e a magnitude entre as dezenas e as centenas de cursos de água (quadro 10). Numa outra perspectiva, e tendo em consideração os valores da densidade de drenagem, nenhuma das bacias hidrográficas estudadas pode ser considerada mal drenada. Existem algumas com densidades das redes de drenagem razoáveis e outras com densidades elevadas e muito elevadas (figura 5).

BACIAS HIDROGRÁFICAS	Comprimento total dos cursos de água (km)	Comprimento do curso de água principal (km)	Hierarquia (Strahler)	Magnitude (Shreve)	Densidade de drenagem (km/km <sup>2</sup> ) (Horton)	Densidade Hídrica (nº cursos de água/km <sup>2</sup> ) (Horton)	Coefficiente de Manutenção (metros) (Schumm)	Coefficiente de Torrencialidade (Vivas)
BARCARENA	97,5	19,2	4	139	2,8	4,0	354	11,4
CAPARIDE	59,3	12,5	4	48	2,9	2,3	345	6,8
COLARES	165,8	15,4	5	211	3,3	4,2	304	13,8
JAMOR	128,8	16,3	5	188	2,9	4,3	340	12,6
LAJE	115,3	17,5	4	136	2,8	3,3	362	9,0
VINHAS	106,9	11,6	5	182	3,9	6,7	255	26,2
ALPRIATE	56,6	8,6	4	55	3,3	3,2	305	10,4
FANHÕES	65,7	8,7	4	61	2,6	2,4	390	6,1
LOURES	251,1	21,5	6	380	3,1	4,7	324	14,4
PÓVOA	115,1	14,4	4	142	2,5	3,1	393	8,0
TRANÇÃO (SB)	428,8	27,6	6	748	4,1	7,1	244	29,3
TRANÇÃO (B)	949,4	33,5	7	1411	3,3	4,9	306	15,8



**Quadro 10** - Resultados dos parâmetros referentes à rede de drenagem

Por outro lado, as bacias hidrográficas não têm, normalmente, densidades hídricas e de drenagem uniformes ao longo de toda a sua extensão, já que o grau de permeabilidade também não costuma ser constante. Por isso, existem sectores das bacias mais bem drenados do que outros, como acontece, por exemplo com Jamor e Barcarena (figura 5). Desta forma, os sectores montantes destas duas bacias possuem maiores densidades de drenagem e hídricas do que os seus sectores intermédios e jusantes (figura 5). Isto deve-se claramente às diferenças de permeabilidade da zona vadosa do Complexo Vulcânico de Lisboa e das formações sedimentares, compostas por calcários e margas (figura 8). Os sectores montantes destas bacias, constituídos por estas rochas sedimentares, acabam por apresentar uma permeabilidade mais baixa da zona não saturada, comparativamente ao que sucede com o Complexo Vulcânico de Lisboa (existente nos outros sectores das bacias). O facto de existirem densidades hídricas bastante significativas nos sectores montantes de Jamor e Barcarena torna-as muito perigosas em situações de cheia, pois o escoamento concentra-se muito rapidamente no colector principal.

De seguida avalia-se a susceptibilidade às cheias através dos resultados da combinação dos índices referentes à rede de drenagem (quadro 11).

REDE DE DRENAGEM		
POSIÇÃO	BACIA HIDROGRÁFICA	VALOR DO ÍNDICE
1ª	TRANCÃO (SB)	4,0
	VINHAS	
3ª	COLARES	2,3
4ª	JAMOR	2,0
	LOURES	
6ª	ALPRIATE	1,8
7ª	BARCARENA	1,5
8ª	CAPARIDE	1,3
9ª	FANHÕES	1,0
	LAJE	
	PÓVOA	

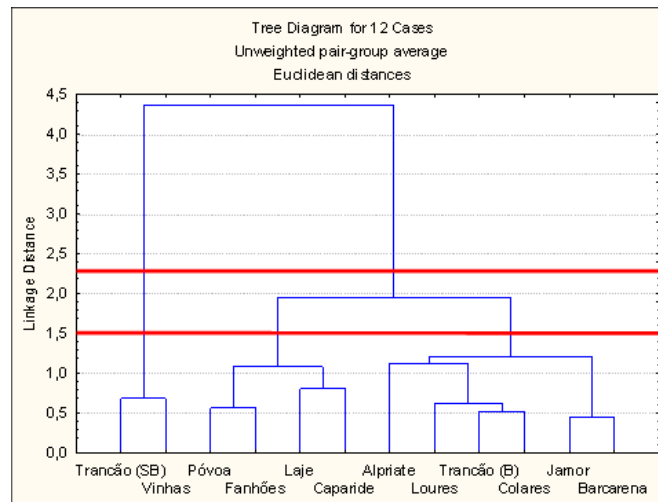
**SUSCEPTIBILIDADE ÀS CHEIAS**

 MUITO ELEVADA  
 MODERADA  
 REDUZIDA  
 MUITO REDUZIDA

**Quadro 11** - Susceptibilidade das bacias às cheias segundo o factor rede de drenagem

É notório, através desta classificação, uma grande disparidade entre as duas bacias hidrográficas mais susceptíveis e as restantes. De tal forma é marcada essa diferença que a classe de susceptibilidade elevada não existe. Outro facto que confirma essa realidade é o valor do índice final da 3ª classificada no ranking (Colares), que é mais próximo do das últimas bacias do que das duas primeiras, como se pode ver no quadro 11. Este quadro demonstra igualmente que, oito das onze bacias apresentam susceptibilidades reduzidas ou muito reduzidas. Assim sendo, Trancão (SB) e Vinhas possuem valores muito elevados de susceptibilidade, apresentando o mesmo valor (4,0) (quadro 11). A bacia de Colares é classificada como tendo uma susceptibilidade moderada, se bem que o seu valor final não é muito diferente do de Jamor, Loures e Alpriate, que ostentam uma susceptibilidade reduzida (quadro 11). Por fim surgem Barcarena, Caparide, Fanhões, Laje e Póvoa, que apresentam valores muito reduzidos.

A análise de clusters (figura 16), resultante dos índices utilizados para a rede drenagem, confirma que Trancão (SB) e Vinhas se destacam das outras. Através do corte superior no dendograma isso perfeitamente é visível, uma vez que todas as outras bacias se agrupam bastante mais cedo. Todavia, e apesar de serem substancialmente diferentes das outras nove bacias, Trancão (SB) e Vinhas são muito semelhantes entre si, como indicava o valor de susceptibilidade, resultante da combinação dos índices utilizados (quadro 11).



**Figura 16** – Análise de clusters (rede de drenagem)

Recorrendo ao corte inferior no dendograma é possível compreender que o grupo maior se subdivide em dois. O primeiro agrupamento, das bacias com susceptibilidades muito reduzidas, é composto por Póvoa, Fanhões, Laje e Caparide (figura 16). De realçar que, no segundo subgrupo, as bacias organizam-se por vizinhança, pois Póvoa junta-se a Fanhões e Laje une-se a Caparide. Isto ocorre porque as características da rede de drenagem são mais parecidas entre si, fruto de substratos geológicos também semelhantes. Ou seja, Póvoa e Fanhões têm substratos idênticos e, por isso, produzem redes de drenagem parecidas. O mesmo acontece com Laje e Caparide. O segundo agrupamento junta as bacias com susceptibilidades moderadas e reduzidas (Alpriate, Loures, Colares e Jamor), para além de Trancão (B) e Barcarena (figura 16). Esta última integra este grupo, apesar de possuir uma susceptibilidade mais baixa do que as restantes por duas razões. Primeiro, porque é, das bacias hidrográficas que compõem a última classe, a que tem um valor final mais elevado (quadro 11). Segundo, porque os resultados dos índices de drenagem são, apesar de mais baixos, análogos aos de Jamor, reflectindo-se, mais uma vez, a questão da proximidade entre duas bacias.

Concluindo a análise deste último factor permanente, pode afirmar-se que as bacias mais susceptíveis às cheias, com base na rede de drenagem, são claramente Trancão (SB) e Vinhas. Já as menos susceptíveis são Fanhões, Laje e Póvoa. No entanto, recorde-se que os resultados de susceptibilidade obtidos são valores médios, relativos à bacia como um todo. Como já se disse, as médias são importantes, mas por vezes escondem situações relevantes, dado que as diferenças dentro das bacias não se reflectem no valor final de susceptibilidade, como foi exemplificado com Jamor e Barcarena.



### 1.5. SUSCEPTIBILIDADE NATURAL DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

Como já foi referido anteriormente, todas as características das componentes físicas das bacias hidrográficas contribuem, de formas distintas, para agravar ou atenuar os efeitos da precipitação. De um modo geral, estes factores interferem na magnitude e na velocidade das cheias, nos tempos de concentração e de resposta e nos caudais sólidos das linhas de água.

Consoante as suas características, as bacias de drenagem apresentam susceptibilidades diferentes para cada factor permanente. O mesmo é dizer que estas componentes têm importâncias distintas em cada uma das bacias. O quadro 12 sintetiza os resultados por bacia e por factor, enquanto o quadro 13 apresenta os valores ponderados que entram no cálculo do índice de susceptibilidade dos factores permanentes (ISfp).

BACIAS HIDROGRÁFICAS	GEOMETRIA	SUBSTRATO GEOLÓGICO	RELEVO	REDE DE DRENAGEM
BARCARENA				
CAPARIDE				
COLARES				
JAMOR				
LAJE				
VINHAS				
ALPRIATE				
FANHÕES				
LOURES				
PÓVOA				
TRANCÃO (SB)				

**SUSCEPTIBILIDADE ÀS CHEIAS**

- MUITO ELEVADA
- ELEVADA
- MODERADA
- REDUZIDA
- MUITO REDUZIDA

**Quadro 12** – Susceptibilidade das bacias às cheias por factor permanente

BACIAS HIDROGRÁFICAS	GEOMETRIA (x1)	SUBSTRATO GEOLÓGICO (x3)	RELEVO (x2)	REDE DE DRENAGEM (x1)
BARCARENA	1,0	8,0	2,8	1,5
CAPARIDE	1,3	3,0	6,8	1,3
COLARES	4,0	5,0	5,6	2,3
JAMOR	1,8	7,0	2,8	2,0
LAJE	1,5	3,0	2,0	1,0
VINHAS	2,3	7,0	8,0	4,0
ALPRIATE	3,0	7,0	6,0	1,8
FANHÕES	4,0	11,0	6,8	1,0
LOURES	2,5	9,0	3,2	2,0
PÓVOA	3,8	11,0	3,2	1,0
TRANCÃO (SB)	2,3	10,0	3,2	4,0

**Quadro 13** – Valores ponderados de cada bacia por factor permanente



O ISfp foi obtido conforme explicado no ponto 2.2 do capítulo I (página 31). Os resultados finais do conjunto das quatro componentes físicas podem ser vistos no quadro 14.

FACTORES PERMANENTES		
POSIÇÃO	BACIA HIDROGRÁFICA	ISfp
1º	FANHÕES	3,3
2º	VINHAS	3,0
3º	TRANCÃO (SB)	2,8
4º	PÓVOA	2,7
5º	ALPRIATE	2,5
6º	COLARES	2,4
	LOURES	
8º	JAMOR	1,9
	BARCARENA	
10º	CAPARIDE	1,8
11º	LAJE	1,1

**SUSCEPTIBILIDADE ÀS CHEIAS**

- MUITO ELEVADA
- ELEVADA
- MODERADA
- REDUZIDA
- MUITO REDUZIDA

**Quadro 14** – Susceptibilidade natural das bacias às cheias

Os resultados do quadro 14 demonstram que Fanhões e Vinhas possuem uma susceptibilidade às cheias muito elevada. Quanto a Fanhões, isso deve-se à acção do substrato geológico e da geometria, mas também devido ao relevo (quadro 12). Vinhas deve o valor muito elevado essencialmente à rede de drenagem e ao relevo (quadro 12).

Da classe seguinte (susceptibilidade elevada) fazem parte: Trancão (SB), Póvoa e Alpriate. Com uma susceptibilidade moderada surgem: Colares e Loures. E, por fim, os valores mais baixos são os de Jamor, Barcarena, Caparide e Laje, que, como se viu durante a análise factor a factor, são claramente as bacias menos susceptíveis. De referir que, Laje é a única que surge classificada como tendo uma susceptibilidade muito reduzida, até porque nenhum dos factores físicos possui características particularmente problemáticas na questão das cheias.

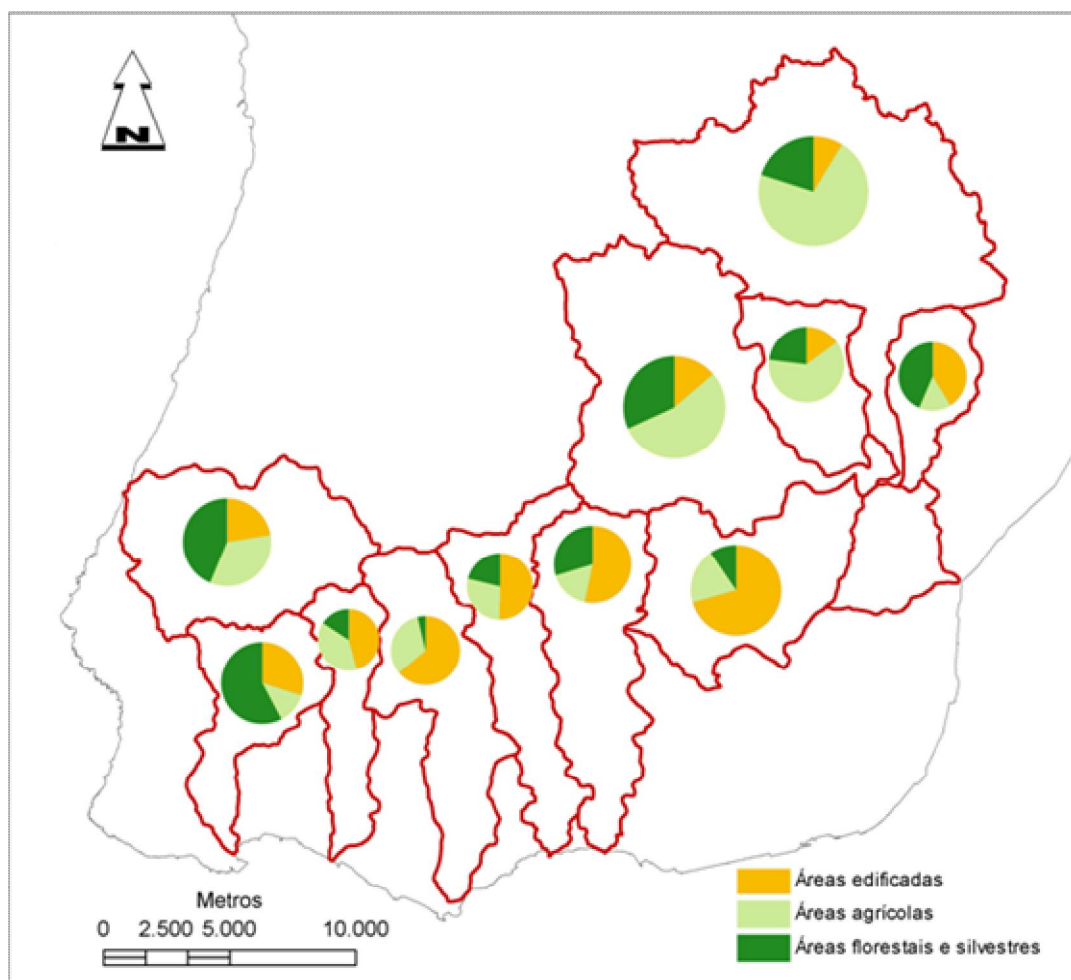
Finalmente, é importante notar que, quando se afirma que uma bacia hidrográfica tem um determinado grau de susceptibilidade, isso significa que esse grau é definido com base na comparação com as restantes bacias. Por exemplo, Fanhões tem uma susceptibilidade muito elevada às cheias, comparativamente às outras dez, e, por isso, é considerada a bacia mais susceptível, tendo apenas em conta as condições naturais.

## 2. FACTORES VARIÁVEIS: EVOLUÇÃO DO USO DO SOLO

As componentes variáveis são aquelas que se alteram com relativa facilidade e que se modificam em pouco tempo: uso/ocupação do território. Como referem Miller *et al.* (2002), as alterações ao longo do tempo no comportamento hidrológico de uma bacia devem-se principalmente às mudanças no uso do solo, pois os factores físicos permanentes são difíceis de modificar. Todas as modificações no uso do solo das bacias de drenagem têm consequências positivas ou negativas no seu comportamento hidrológico. No entanto, as tendências de modificação que se observam actualmente (expansão das superfícies impermeabilizadas, abandono das áreas agrícolas e desflorestação) actuam no sentido de agravar as condições naturais das bacias (Booth, 1991; Ferreira C. e Ferreira A., 2010).

Quando se pensa na acção antrópica nas bacias hidrográficas, é frequente associá-la apenas à ocupação indevida dos leitos de cheia, contudo, a intervenção humana não condiciona somente a vulnerabilidade, mas também a susceptibilidade e a perigosidade às cheias. Na verdade, a ocupação do solo exerce uma acção semelhante à do substrato geológico, já que condiciona a infiltração e, consequentemente, o tipo de escoamento.

Os diferentes usos do solo podem ser agrupados em áreas edificadas, áreas agrícolas e áreas florestais e silvestres. Na figura 17 observam-se as características da ocupação do território em 2006 nas bacias hidrográficas analisadas. Em função das várias distribuições verificadas, pode então dizer-se que existem bacias com um processo de urbanização avançado (Póvoa, Jamor, Barcarena, Laje e Caparide), bacias maioritariamente agrícolas (Loures, Trancão (SB) e Fanhões) e bacias predominantemente florestais (Vinhas e Colares). Quanto a Alpriate, pode ver-se que as áreas urbanas e as áreas florestais tinham, em 2006, um peso semelhante (figura 17). Numa outra perspectiva, a figura 18 mostra a distribuição destes três agrupamentos de usos do solo dentro das bacias, em 1990 e em 2006.



**Figura 17** – Usos do solo em cada bacia

## 2.1. ÁREAS EDIFICADAS

“De todas as mudanças no uso do solo que afectam a hidrologia de uma área, a urbanização é, de longe, a mais importante” (Leopold, 1968: p.1).

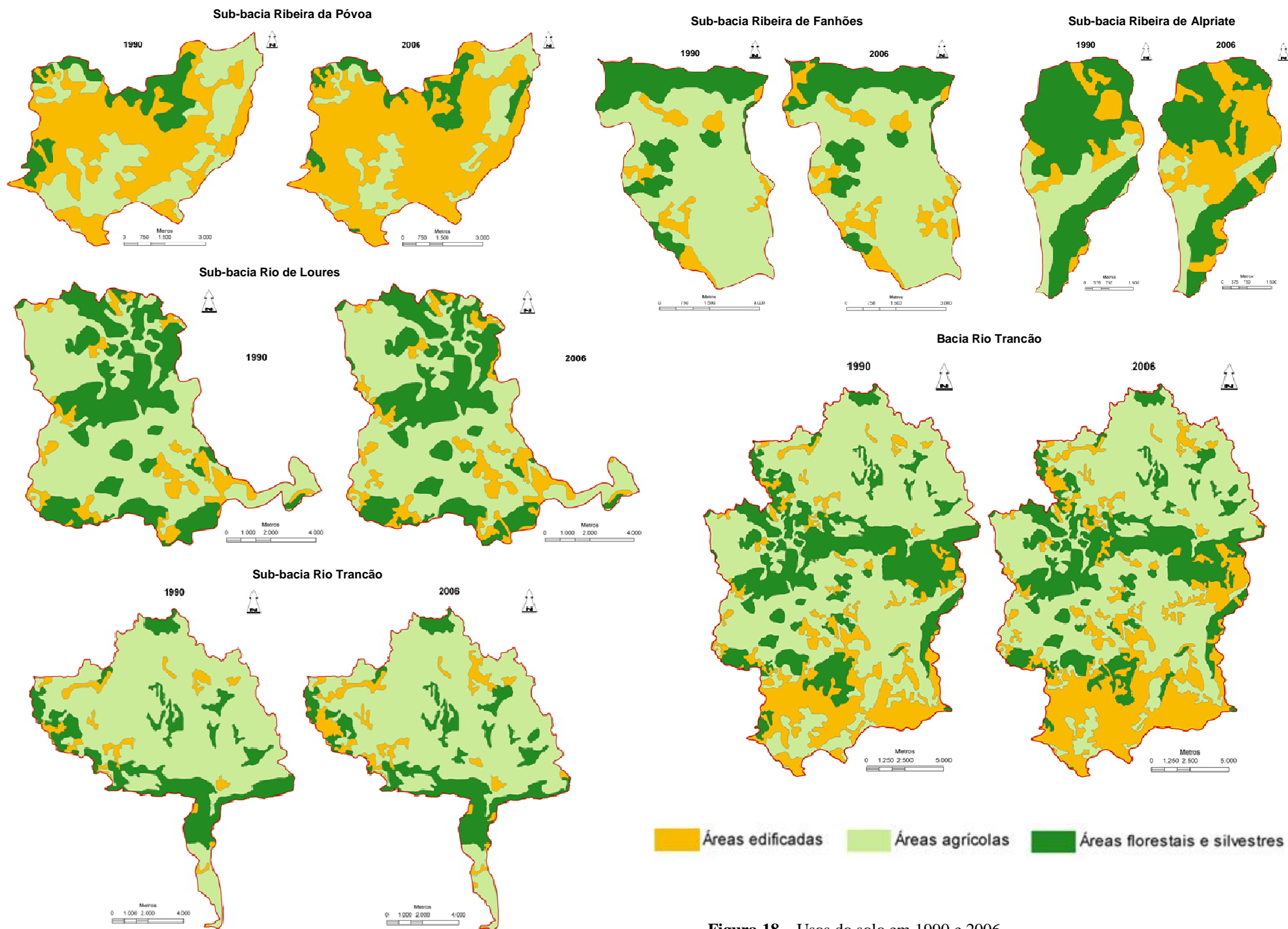
A redução do grau de infiltração é a principal alteração que a urbanização induz no comportamento hidrológico de uma bacia, e é a que desencadeia os restantes efeitos. Assim, o aumento das áreas impermeabilizadas origina a diminuição da infiltração (Lencastre e Franco, 2006). Daqui resulta um decréscimo das perdas de precipitação, ou seja, um acréscimo da precipitação útil (Portela *et al.*, 2000; Ferreira C. e Ferreira A., 2010). Contudo, há que dizer que, os impactes das áreas edificadas diferem consoante a superfície ocupada e o tipo de urbanização, mas igualmente consoante as condições naturais anteriores (Ramos, 2009). Por exemplo, se, antes do processo de urbanização, o substrato geológico for pouco permeável, então os efeitos da impermeabilização antrópica serão menos acentuados (Ramos, 2009). No

entanto, como lembram Smith e Ward (1998), o que mais distingue as superfícies urbanas é que são menos permeáveis do que a maioria das superfícies que substituem.

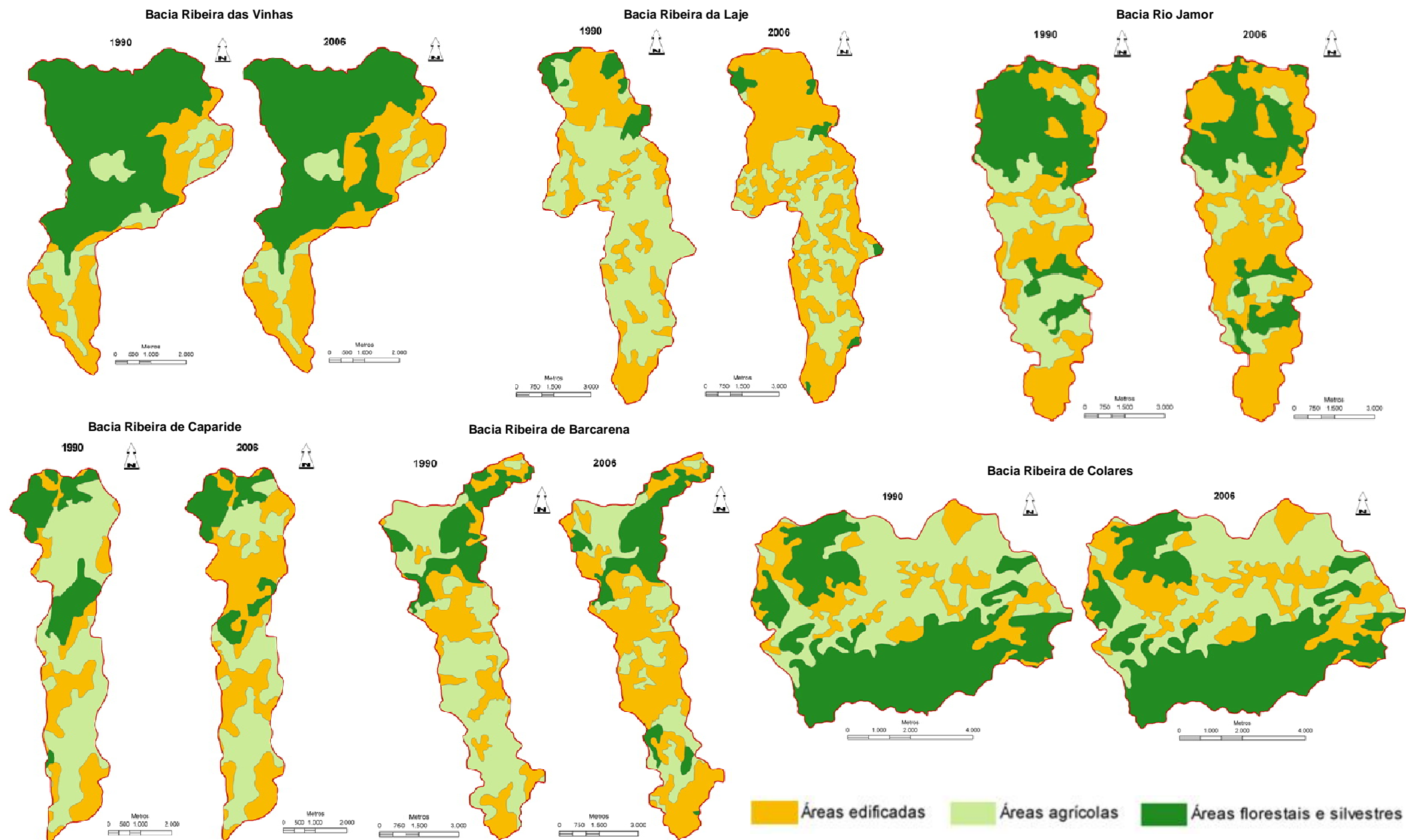
Como salientam diversos autores, um dos impactes da impermeabilização dos solos é o incremento do escoamento superficial. Dependendo da percentagem da bacia que esteja impermeabilizada, admite-se que os valores de escoamento possam ser cinco vezes superiores aos que ocorrem em condições naturais (Hollis, 1975; Arnold e Gibbons, 1996). Por isso, os caudais de ponta passam a ter uma maior magnitude (figura 19). No entanto, a influência da urbanização é mais significativa nos caudais de ponta com períodos de retorno mais baixos do que em eventos com períodos de retorno elevados (Hollis, 1975; Portela *et al.*, 2000; Brath *et al.*, 2006; Saghafian *et al.*, 2008; Ferreira C. e Ferreira A., 2010). A explicação reside no facto de as precipitações que dão origem às cheias de maior severidade, induzirem a saturação dos solos ou ocorrerem quando estes já estão saturados. Isto significa que, depois de uma precipitação intensa e relativamente prolongada, os graus de permeabilidade de uma área urbana e de uma área saturada não urbana acabam por ser semelhantes (Smith e Ward, 1998).

Outro dos efeitos conhecidos da urbanização é o aumento da velocidade do escoamento, que se traduz na redução dos tempos de concentração e na antecipação das pontas de cheia (figuras 19 e 20). Estes acréscimos da velocidade do escoamento devem-se à menor resistência que as superfícies urbanas oferecem ao deslocamento da água e à existência dos sistemas de drenagem de águas pluviais (Leopold, 1968; Portela *et al.*, 2000; Lencastre e Franco, 2006; Ramos, 2009; NOAA, 2010). Como demonstra a figura 20, a velocidade que o escoamento atinge numa área urbana é bastante superior à atingida em áreas florestais ou agrícolas.

A crescente impermeabilização de uma bacia hidrográfica leva ainda ao aumento da frequência das cheias (Bichançã, 2006), e, como tal, da sua perigosidade. Para ocorrerem cheias em ambientes urbanos não são necessários valores de precipitação tão elevados como seriam para ambientes rurais (NOAA, 2010). Por isso, para além de haver a amplificação das já existentes, passam a existir novas pontas de cheia (Booth, 1991). Este aumento da frequência das cheias faz com que haja uma redução dos seus períodos de retorno. Ou seja, com a expansão da edificação, uma cheia com um determinado período de retorno passa a ter um período de retorno mais baixo.

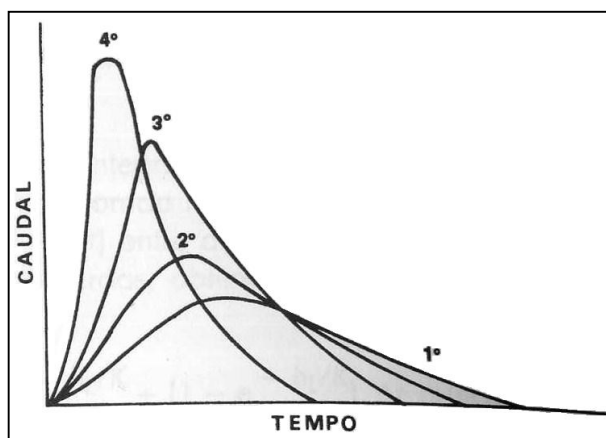


**Figura 18 – Usos do solo em 1990 e 2006**

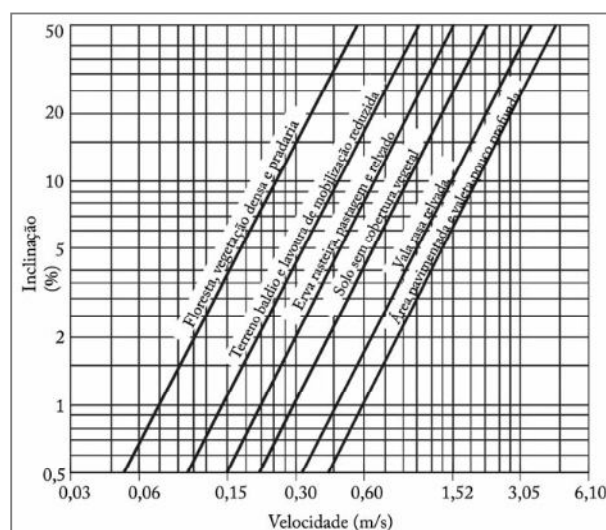


**Figura 18 (cont.) – Usos do solo em 1990 e 2006**





**Figura 19** – Modificação do hidrograma de cheia devido à progressiva urbanização de uma bacia hidrográfica (*in* Lencastre e Franco, 2006: p. 320)



**Figura 20** – Valores médios de velocidade do escoamento superficial em função da inclinação e do uso do solo (*in* Lima J. e Lima I., 2010: p. 168)

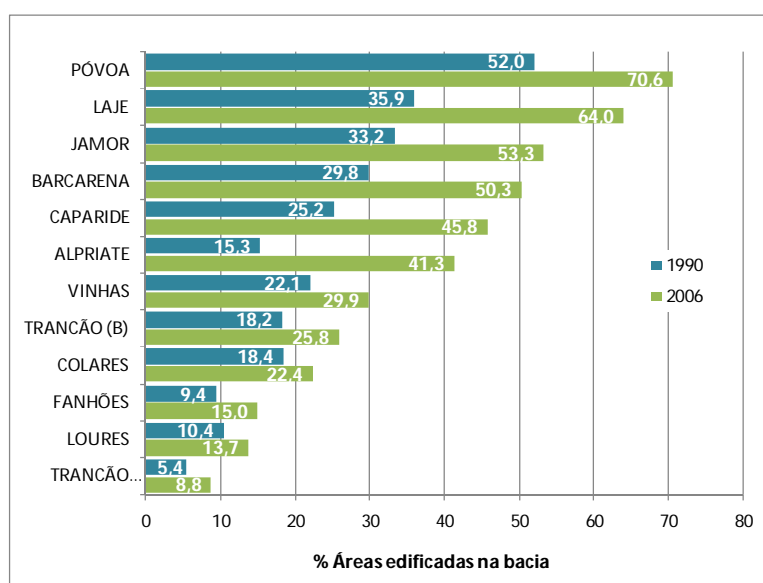
Portanto, o decréscimo do grau de permeabilidade das superfícies conduz essencialmente a três efeitos: aumento da velocidade do escoamento, aumento da magnitude dos caudais de ponta e aumento da frequência das cheias. Deste modo, em comparação com as suas condições naturais, os cursos de água em bacias urbanizadas entrarão em situação de cheia de uma forma mais rápida e frequente e terão maiores picos de escoamento (NOAA, 2010). Estes três principais impactes da expansão das áreas urbanas podem ainda conduzir a inundações resultantes do subdimensionamento dos sistemas de drenagem artificiais (Booth, 1991; Smith e Ward, 1998).

Por outro lado, o processo de urbanização pode igualmente provocar alargamentos e aprofundamentos dos canais fluviais, uma vez que o potencial erosivo dos caudais de ponta

aumenta (Booth, 1991; Ramos, 2009). Este processo pode ainda implicar o desvio, a canalização ou a supressão de linhas de água, contribuindo para uma modificação da rede hidrográfica (Pereira e Ventura, 2004).

A região de Lisboa registou, a partir da década de 60, um aumento crescente da pressão urbana, em parte à custa do florescimento das áreas urbanas de génese ilegal (AUGI) (Duarte *et al.*, 2005). É, portanto, na segunda metade do século XX que o processo de suburbanização se intensifica, acentuando a vulnerabilidade às cheias nas periferias da cidade de Lisboa (Pereira e Ventura, 2004).

Através da figura 21 pode ver-se que a bacia cujo processo de urbanização está mais desenvolvido é Póvoa, tendo, já em 1990, mais de 50% da sua superfície composta por áreas edificadas, à qual se seguem bacias como Laje, Jamor ou Barcarena. As bacias hidrográficas menos urbanizadas são Fanhões, Loures e Trancão (SB), pois têm características marcadamente rurais, onde dominam as actividades ligadas à agricultura. No que respeita às bacias de cariz florestal/silvestre, estas têm uma percentagem de áreas edificadas com alguma importância que resultam de modelos de ocupação e de expansão diferentes. A bacia da ribeira das Vinhas tem dois sectores com áreas edificadas, um na parte Nordeste onde dominam as moradias e outro na parte Sul onde existe uma construção mais densa (Cascais). Na bacia da ribeira de Colares a ocupação é dispersa no seu interior e mais concentrada junto ao litoral, onde se localizam algumas das segundas habitações de quem reside em Lisboa ou nos seus subúrbios. A evolução das áreas edificadas entre 1990 e 2006 pode ser observada na figura 21 e no quadro 15.



**Figura 21** – Percentagem de áreas edificadas nas bacias em 1990 e 2006

BACIAS HIDROGRÁFICAS	EVOLUÇÃO DAS ÁREAS EDIFICADAS (1990-2006) (%)
BARCARENA	+21%
CAPARIDE	+21%
COLARES	+4%
JAMOR	+20%
LAJE	+28%
VINHAS	+8%
ALPRIATE	+26%
FANHÕES	+6%
LOURES	+3%
PÓVOA	+19%
TRANCÃO (SB)	+3%
TRANCÃO (B)	+8%

**Quadro 15** – Evolução das áreas edificadas entre 1990 e 2006 em relação à superfície total da bacia



Em termos evolutivos (1990-2006), o facto que mais se destaca é o aumento das áreas edificadas em todas as bacias. Este crescimento é menor nas bacias agrícolas (Loures, Trancão (SB) e Fanhões) e florestais (Colares e Vinhas), e é bastante mais acentuado nas bacias com um carácter mais urbano (figura 21 e quadro 15). Ou seja, é nas bacias cujo processo de urbanização estava mais avançado em 1990 que a expansão das áreas edificadas foi maior nos 16 anos seguintes, o que fez aumentar ainda mais o contraste entre estas bacias e as de cariz agrícola e florestal/silvestre.

Em Barcarena, Caparide, Jamor e Póvoa, os aumentos das áreas edificadas rondam os 20% e na Laje e em Alpriate são da ordem dos 25 a 30% (figura 21 e quadro 15). Assim, destas bacias referidas, há três que se destacam por razões distintas: Póvoa, Laje e Alpriate.

A primeira é a mais urbanizada das bacias da AML Norte, uma vez que, mais de 70% da sua superfície é composta por áreas edificadas (figura 21). Duarte *et al.* (2005) constataram que, entre 1969 e 2000, as áreas urbanizadas aumentaram 52%, afectando não só os núcleos populacionais que já existiam, mas também gerando novos perímetros urbanos. Actualmente, a paisagem desta bacia é muito marcada pela existência de aglomerados populacionais densos, como Odivelas.

Laje é, das bacias estudadas, a que apresentou, entre 1990 e 2006, um maior crescimento das áreas edificadas (28%), aproximando-se dos 65% de superfície urbanizada (figura 21 e quadro 15). Saraiva *et al.* (1998) confirmaram o aumento destas áreas desde a década de 60, sendo este desenvolvimento progressivamente mais rápido ao longo das décadas. Os mesmos autores observaram ainda que a expansão das áreas urbanas se efectuou, em primeiro lugar, na cabeceira e no sector terminal. Actualmente, a figura 18 mostra que este crescimento se efectua um pouco por toda a bacia. Um outro facto importante é que, praticamente, todo o seu sector montante está impermeabilizado devido à acção antrópica, o que se torna perigoso em situações de cheias rápidas (figura 18).

No que diz respeito a Alpriate, a situação mais relevante é o incremento muito significativo das áreas edificadas (26%), o que faz com que, em apenas 16 anos, estas áreas aumentem quase para o triplo (de 15,3 para 41,3%) (figura 21 e quadro 15). Isto significa que, em menos de duas décadas, esta bacia passou a ter uma componente urbana muito significativa, o que a torna substancialmente mais susceptível às cheias. Todavia, ao contrário de bacias como Póvoa, Laje ou Jamor, que em 1990 já possuíam áreas edificadas bastante desenvolvidas, Alpriate apresentou uma expansão urbana mais tardia.

Os resultados anteriores correspondem às percentagens de evolução das áreas edificadas relativamente às superfícies totais de cada bacia. Assim, quando se diz que houve

um aumento de 20%, isso significa que há mais 20% da bacia ocupada por áreas edificadas. Porém, é possível fazer outro tipo de análise, tendo apenas como referência as áreas edificadas (entre 1990 e 2006). Para tal, em vez de se considerar a superfície total da bacia, considera-se apenas a superfície ocupada pelas áreas edificadas *per se*. Exemplificando, numa bacia com 100 km<sup>2</sup>, 5% dessa superfície era ocupada, em 1990, por áreas edificadas, enquanto em 2006, essa percentagem cresceu para 10%. Na prática, há mais 5% da bacia ocupada por áreas edificadas, mas, tendo em conta a situação de partida (em 1990), essas áreas aumentaram 100%. O que o quadro 16 mostra é exactamente esse tipo de crescimento.

BACIAS HIDROGRÁFICAS	EVOLUÇÃO DAS ÁREAS EDIFICADAS (1990-2006) (%)
BARCARENA	+69%
CAPARIDE	+82%
COLARES	+22%
JAMOR	+61%
LAJE	+78%
VINHAS	+35%
ALPRIATE	+170%
FANHÕES	+60%
LOURES	+32%
PÓVOA	+36%
TRANCÃO (SB)	+63%
TRANCÃO (B)	+42%

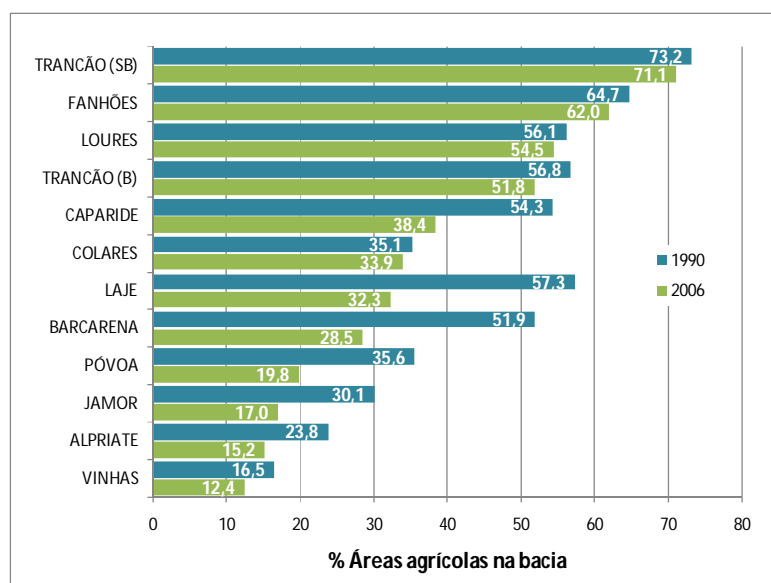
**Quadro 16** – Evolução das áreas edificadas entre 1990 e 2006

Este quadro fornece informações diferentes das já referidas, porque existem bacias onde a expansão das áreas edificadas pode ser pouco expressiva no conjunto da bacia, mas ser acentuada face à realidade anterior desse tipo de ocupação. Isso acontece em Fanhões e Trancão (SB), cuja edificação continua sem ter grande expressão e cujo crescimento não é particularmente significativo em termos totais, contudo, há um incremento da ordem dos 60% em 16 anos (quadro 16). Em termos relativos, os crescimentos observados nestas duas bacias são semelhantes ao que se verifica na bacia do Jamor. Todavia, o desenvolvimento mais impressionante das áreas edificadas é o de Alpriate (170%). Este valor é particularmente expressivo, porque se trata de um crescimento repentino que acontece numa bacia que, até 1990, não apresentara uma expansão urbana significativa.

## 2.2. ÁREAS AGRÍCOLAS

Ao contrário das áreas edificadas, os terrenos agrícolas não têm uma influência tão expressiva no comportamento hidrológico das bacias de drenagem, se bem que, as actividades agrícolas operam no sentido de zelar pelo correcto funcionamento do sistema hidrológico (Pereira e Ventura, 2004). No entanto, o facto de os terrenos serem lavrados no início da época das chuvas pode conduzir a fenómenos de erosão hídrica, que fazem aumentar significativamente o caudal sólido dos cursos de água em situações de cheia. Admite-se que existem algumas práticas agrícolas que podem provocar cheias a nível local (O'Connell *et al.*, 2007).

A figura 22 permite constatar que as bacias com uma maior componente agrícola são Trancão (SB), Fanhões e Loures, com mais de metade da superfície ocupada por actividades ligadas à agricultura. Para além destas, em 1990, havia mais três bacias com um forte pendor agrícola: Caparide, Laje e Barcarena. Na outra extremidade encontram-se Jamor, Alpriate e Vinhas. A evolução das áreas agrícolas entre 1990 e 2006 pode ser observada na figura 22 e no quadro 17.



**Figura 22** – Percentagem de áreas agrícolas nas bacias em 1990 e 2006

BACIAS HIDROGRÁFICAS	EVOLUÇÃO DAS ÁREAS AGRÍCOLAS (1990-2006) (%)
BARCARENA	-23%
CAPARIDE	-16%
COLARES	-1%
JAMOR	-13%
LAJE	-25%
VINHAS	-4%
ALPRIATE	-9%
FANHÕES	-3%
LOURES	-2%
PÓVOA	-16%
TRANCÃO (SB)	-2%
TRANCÃO (B)	-5%

**Quadro 17** – Evolução das áreas agrícolas entre 1990 e 2006 em relação à superfície total da bacia

Entre 1990 e 2006, verificaram-se decréscimos nas áreas destinadas à agricultura em todas as bacias, que acabaram por ser menos acentuadas em algumas das bacias agrícolas e nas bacias florestais (Vinhas e Colares) (figura 22 e quadro 17). Das seis que, em 1990,

estavam muito ligadas à agricultura, Trancão (SB), Fanhões e Loures mantiveram a sua feição agrícola em 2006 (reduções entre 2 e 3%), ao contrário de Caparide, Laje e Barcarena que modificaram a sua ocupação do solo de uma forma muito rápida (decréscimos das áreas agrícolas entre 16 e 25%), tornando-se bacias predominantemente urbanizadas (figuras 21 e 22 e quadros 15 e 17). Também Póvoa e Jamor apresentam diminuições relevantes.

O quadro 18 demonstra o decréscimo das áreas agrícolas, face à realidade de 1990, sem atender ao conjunto da bacia. A informação mais importante que se pode retirar deste quadro é que as áreas agrícolas que registaram os maiores declínios são as das bacias com fortes crescimentos urbanos, com valores a rondar os 45% (Barcarena, Jamor, Laje e Póvoa). O que significa que, em 16 anos, quase metade dos terrenos agrícolas destas quatro bacias desapareceram.

BACIAS HIDROGRÁFICAS	EVOLUÇÃO DAS ÁREAS AGRÍCOLAS (1990-2006) (%)
BARCARENA	-45%
CAPARIDE	-29%
COLARES	-3%
JAMOR	-43%
LAJE	-44%
VINHAS	-25%
ALPRIATE	-36%
FANHÕES	-4%
LOURES	-3%
PÓVOA	-44%
TRANCÃO (SB)	-3%
TRANCÃO (B)	-9%

**Quadro 18** – Evolução das áreas agrícolas entre 1990 e 2006

Na outra extremidade em termos de decréscimos, surgem as bacias hidrográficas predominantemente agrícolas (Fanhões, Loures e Trancão (SB), assim como Colares (reduções entre 3 e 4%) (quadro 18). Estes números demonstram que as características destas bacias em termos de uso do solo se mantiveram. Através da figura 18 vê-se que os terrenos mais ricos destas bacias (várzeas de Loures e de Colares) continuaram a ser quase exclusivamente agrícolas, também porque são áreas onde as inundações são frequentes.

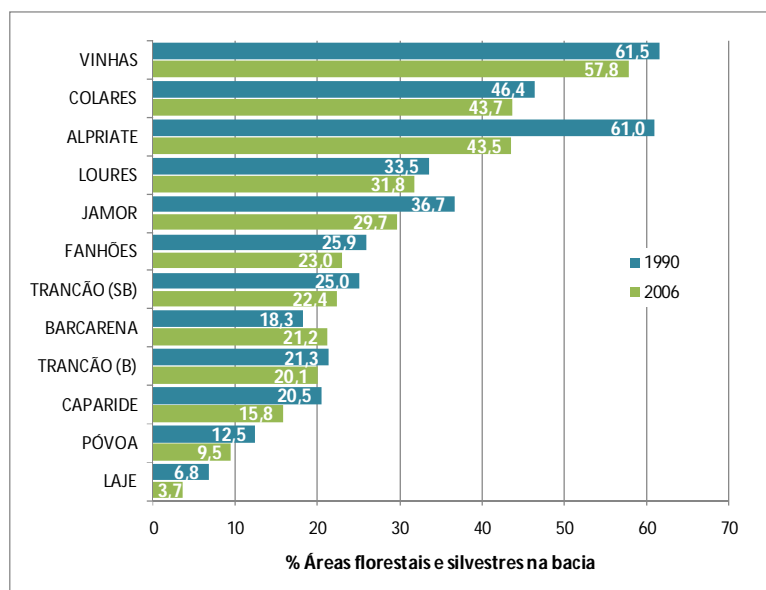
### 2.3. ÁREAS FLORESTAIS E SILVESTRES

A existência de florestas e de bosques exerce uma influência assinalável na circulação da água numa bacia hidrográfica, essencialmente porque permite a intercepção de parte da precipitação e porque favorece igualmente a infiltração da água, o que faz diminuir o escoamento directo (Ramos, 2009; Ferreira C. e Ferreira A., 2010). Para além do escoamento superficial ser menor, a sua velocidade é também inferior, o que contribui para a redução dos fenómenos de erosão hídrica (Ramos, 2009). Assim, a presença de áreas florestais possibilita a atenuação de cheias de baixa e média magnitude (Smith e Ward, 1998; Ferreira C. e Ferreira A., 2010).

Por contraponto, os fenómenos de desflorestação agravam as situações de cheia porque diminuem a intercepção da chuva pela folhagem e a capacidade de infiltração dos solos e, por isso, o volume e a velocidade do escoamento superficial são maiores, o que aumenta capacidade erosiva e de transporte de carga sólida das linhas de água (Smith e Ward, 1998; Lencastre e Franco, 2006; Langhammer e Vilimek, 2008; Ramos, 2009; NOAA, 2010). Tudo isto torna as cheias mais gravosas, uma vez que aumenta as pontas de cheia e diminui o tempo de concentração de uma bacia de drenagem (Lencastre e Franco, 2006).

As florestas podem ainda estar sujeitas aos incêndios. Os solos quando estão queimados tornam-se hidrofóbicos e, portanto, tornam-se praticamente impermeáveis, o que faz aumentar o escoamento superficial (Ferreira C. e Ferreira A., 2010; NOAA, 2010). É claro que o efeito dos incêndios é temporário, já que os solos acabam por se regenerar de uma forma natural ou através de acções antrópicas.

No entanto, é importante não esquecer que as áreas florestais e silvestres, não englobam apenas florestas e bosques, mas igualmente matos e pastagens. Efectivamente, na maioria das bacias hidrográficas estudadas até predominam os matos e as pastagens em detrimento das florestas. A excepção mais expressiva é a bacia da ribeira de Colares, que tem uma ocupação marcadamente arbórea. Desta forma, para além de Colares, as bacias com maiores percentagens de áreas florestais e silvestres eram, em 1990, Vinhas e Alpriate, cabendo as menores percentagens a Póvoa e Laje (figura 23). A evolução destas áreas entre 1990 e 2006 pode ser observada na figura 23 e no quadro 19.



**Figura 23** – Percentagem de áreas florestais e silvestres nas bacias em 1990 e 2006

BACIAS HIDROGRÁFICAS	EVOLUÇÃO DAS ÁREAS FLORESTAIS E SILVESTRES (1990-2006) (%)
BARCARENA	+3%
CAPARIDE	-5%
COLARES	-3%
JAMOR	-7%
LAJE	-3%
VINHAS	-4%
ALPRIATE	-18%
FANHÕES	-3%
LOURES	-2%
PÓVOA	-3%
TRANCÃO (SB)	-1%
TRANCÃO (B)	-3%

**Quadro 19** – Evolução das áreas florestais e silvestres entre 1990 e 2006 em relação à superfície total da bacia

Entre 1990 e 2006, houve uma redução da percentagem de áreas florestais e silvestres em todas as bacias, menos em Barcarena, onde se observou um aumento de 3% (figura 23 e quadro 19). Regra geral, estas diminuições não foram muito acentuadas, exceptuando o caso de Jamor (7%), mas especialmente o de Alpriate (18%) (figura 23 e quadro 19). De facto, em 16 anos, Alpriate passou de uma bacia claramente florestal (61% da área total) para uma bacia em que a urbanização e as florestas/pastagens têm um peso semelhante (cerca de 40%) (figura 17).

A evolução destas áreas, não considerando o total de cada bacia, pode ser visto no quadro 20. A maioria dos resultados não é tão expressiva quanto os valores verificados para as áreas edificadas e para as áreas agrícolas. Ainda assim, as maiores reduções observaram-se nas áreas florestais e silvestres da bacia da Laje (46%), porém, a sua percentagem já era bastante diminuta em 1990, o que faz com que este número não seja especialmente relevante. De seguida, os maiores decréscimos verificaram-se nas bacias de Caparide, Jamor, Alpriate e Póvoa (quadro 20). Contudo, as reduções deste tipo de uso do solo acabam por ser mais importantes em Alpriate e no Jamor, do que em Caparide e na Póvoa, devido à dimensão das áreas florestais e silvestres em 1990. Em contraciclo surgiu Barcarena que, sendo uma bacia considerada urbana, foi a única que apresentou um pequeno aumento destas áreas (quadro 20). As menores reduções, entre 5 e 11%, ocorreram nas bacias agrícolas e florestais, ou seja, em Fanhões, Loures, Trancão (SB), Colares e Vinhas (quadro 20).

BACIAS HIDROGRÁFICAS	EVOLUÇÃO ÁREAS FLORESTAIS E SILVESTRES (1990-2006) (%)
BARCARENA	+16%
CAPARIDE	-23%
COLARES	-6%
JAMOR	-19%
LAJE	-46%
VINHAS	-6%
ALPRIATE	-29%
FANHÕES	-11%
LOURES	-5%
PÓVOA	-24%
TRANCÃO (SB)	-6%
TRANCÃO (B)	-10%

**Quadro 20** – Evolução das áreas florestais e silvestres entre 1990 e 2006

Numa outra perspectiva, é essencial conhecer não só os valores de desflorestação nas bacias, mas também onde é que estas situações ocorreram em cada bacia. Sabe-se que, quando existe desflorestação nos sectores montantes, os seus efeitos são maiores do que quando ocorre noutras secções da bacia (Langhammer e Vilimek, 2008; Ferreira C. e Ferreira A., 2010). Isto acontece porque é nas cabeceiras que se forma o escoamento e, com a desflorestação atingem-se maiores valores de escoamento, já que a existência de formações arbóreas permite a intercepção de parte da precipitação e facilita a sua infiltração. Todavia, o efeito no hidrograma de cheia de um volume adicional de escoamento superficial, resultante da desflorestação das cabeceiras, torna-se menos importante à medida que o pico de cheia se move para jusante (Smith e Ward, 1998). Onde a desflorestação dos sectores montantes é mais notória entre 1990 e 2006 é nas bacias de Alpriate, Caparide, Laje e Jamor (figura 18).

#### **2.4. SUSCEPTIBILIDADE ANTRÓPICA DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS**

As bacias hidrográficas estudadas estão inseridas em contextos diferentes dentro da AML Norte e, por isso, as suas características e dinâmicas do uso do solo são distintas. Deste modo, o fenómeno da suburbanização, que atingiu um forte crescimento a partir da segunda metade do século XX, estendeu-se sobretudo ao longo dos eixos de Cascais, Sintra e Vila Franca de Xira (Costa, 2004; Barbosa, 2005). Foi ao longo destes eixos ferroviários e nos aglomerados urbanos em volta da cidade de Lisboa (Amadora, Odivelas e Loures) que a expansão das áreas edificadas se fez de uma forma mais acentuada ao longo das últimas

décadas. Como tal, as bacias hidrográficas aí localizadas foram as mais afectadas com a impermeabilização dos solos, resultante da construção em antigas áreas agrícolas. Por outro lado, as bacias situadas fora deste contexto de crescimento suburbano mantiveram características agrícolas ou florestais.

Entre 1990 e 2006, estas tendências conservaram-se, ou seja, mais de metade das bacias viram o seu processo de urbanização aumentar de forma significativa, exceptuando as que preservaram o seu pendor agrícola (Fanhões, Loures e Trancão (SB)) ou florestal/silvestre (Colares e Vinhas) (figura 21 e quadros 15). Apesar do grau de modificação variar de bacia para bacia, a verdade é que, em todas elas, se verificaram aumentos das áreas edificadas (figura 21 e quadros 15). O que se apurou é que estes acréscimos ocorreram, maioritariamente, à custa das áreas agrícolas, em especial nas bacias de Barcarena, Caparide, Jamor, Laje e Póvoa (quadro 21). A excepção a esta norma é Alpriate, cujas áreas urbanizadas aumentaram bastante no período de tempo estudado, mas 2/3 deste incremento foi feito em detrimento das áreas florestais e silvestres (quadro 21). No entanto, parte da explicação destas realidades está, por certo, relacionada com a natureza das bacias na situação de partida (1990). Por exemplo, Alpriate e Colares tinham, nesse ano, um cariz predominantemente florestal/silvestre, enquanto Laje tinha um pendor mais agrícola (figura 18).

BACIAS HIDROGRÁFICAS	AUMENTO DAS ÁREAS EDIFICADAS (1990-2006) (%)	
	À CUSTA DAS ÁREAS AGRÍCOLAS	À CUSTA DAS ÁREAS FLORESTAIS E SILVESTRES
BARCARENA	100%	0%
CAPARIDE	77%	23%
COLARES	30%	70%
JAMOR	65%	35%
LAJE	89%	11%
VINHAS	53%	47%
ALPRIATE	33%	67%
FANHÕES	48%	52%
LOURES	49%	51%
PÓVOA	85%	15%
TRANCÃO (SB)	62%	38%
TRANCÃO (B)	66%	34%
MÉDIA	63%	37%

**Quadro 21** – Aumento das áreas edificadas em detrimento das áreas agrícolas e/ou das áreas florestais e silvestres



Perspectivando o futuro, as tendências de expansão das áreas edificadas que se verificaram até 2006, em princípio, devem manter-se, tornando a AML Norte progressivamente mais impermeabilizada. Contudo, como já se percebeu, os ritmos de crescimento diferem de bacia para bacia.

Após serem conhecidas as características da ocupação do território das diversas bacias hidrográficas analisadas, assim como a sua evolução entre 1990 e 2006, podem observar-se, no quadro 22, os valores que permitem calcular o índice de susceptibilidade dos factores variáveis (ISfv). Este índice foi obtido conforme explicado no ponto 2.2 do capítulo I (página 34). Os resultados finais das componentes variáveis são revelados no quadro 23.

BACIAS HIDROGRÁFICAS	ÁREAS EDIFICADAS (%) (x2)	AUMENTO ÁREAS EDIFICADAS (%) (x1)	ÁREAS FLORESTAIS (%) (x1)	TOTAL
BARCARENA	6	3	3	12
CAPARIDE	6	3	4	13
COLARES	2	1	2	5
JAMOR	6	3	3	12
LAJE	8	4	4	16
VINHAS	4	1	1	6
ALPRIATE	6	4	2	12
FANHÕES	2	1	3	6
LOURES	2	1	2	5
PÓVOA	8	3	4	15
TRANCÃO (SB)	2	1	3	6

**Quadro 22** - Valores ponderados de cada bacia para os factores variáveis

FACTORES VARIÁVEIS		
POSIÇÃO	BACIA HIDROGRÁFICA	ISfv
1º	LAJE	4,0
2º	PÓVOA	3,8
3º	CAPARIDE	3,3
4º	ALPRIATE	3,0
	BARCARENA	
	JAMOR	
7º	FANHÕES	1,5
	TRANCÃO (SB)	
	VINHAS	
10º	COLARES	1,3
	LOURES	

**SUSCEPTIBILIDADE ÀS CHEIAS**

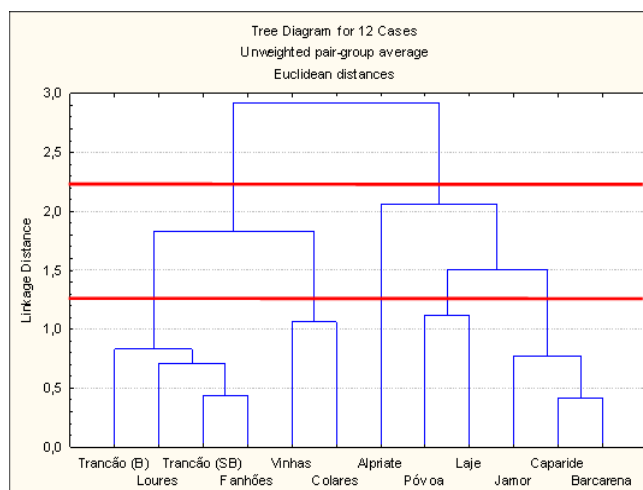
	MUITO ELEVADA
	ELEVADA
	MODERADA
	MUITO REDUZIDA

**Quadro 23** - Susceptibilidade antrópica das bacias às cheias

A primeira conclusão que se pode retirar a partir dos valores do ISfv é que há uma distinção clara entre duas realidades contrastadas: o “mundo urbano” e o “mundo rural”. O primeiro é composto pelas seis primeiras bacias do ranking: Laje, Póvoa, Caparide, Alpriate, Barcarena e Jamor. O segundo é constituído pelas bacias agrícolas ou florestais/silvestres (susceptibilidade muito reduzida): Fanhões, Trancão (SB), Vinhas, Colares e Loures. Como existe uma separação considerável entre estas duas realidades, nem sequer existem bacias com susceptibilidades reduzidas.

Se entre as bacias rurais não existem praticamente diferenças, quanto às de características urbanizadas notam-se algumas dissemelhanças entre elas. Assim sendo, as bacias moderadamente susceptíveis às cheias são Alpriate, Barcarena e Jamor; a única de susceptibilidade elevada é Caparide e as de susceptibilidade muito elevada são Laje e Póvoa (quadro 23). Estas duas últimas são as que mais se destacam porque têm as percentagens mais elevadas de áreas edificadas e as percentagens mais baixas de áreas florestais e silvestres (figuras 21 e 23). Por outro lado, os seus valores do ISfv são diferentes, uma vez que Laje tem um incremento das áreas edificadas entre 1990 e 2006 superior ao da Póvoa (quadro 15). No que diz respeito a Alpriate, esta bacia tem algumas especificidades que a distinguem de Barcarena e Jamor, dado que a evolução das áreas edificadas no período estudado é maior e as áreas florestais/silvestres são mais importantes em Alpriate (figuras 21 e 23 e quadros 15 e 19). Quanto a Caparide, está mais próxima das bacias com susceptibilidades moderadas do que de Póvoa e Laje. Isto sucede porque as suas características de ocupação do solo são mais semelhantes às de Barcarena e Jamor, sendo que, a principal diferença é que Caparide tem uma menor percentagem de áreas florestais e silvestres do que as outras duas (figura 23).

Para testar estes resultados efectuou-se uma análise de clusters com os resultados dos índices utilizados no uso do solo (figura 24).



**Figura 24** – Análise de clusters (uso do solo)

Confirma-se quase a totalidade das conclusões retiradas a partir da metodologia anterior. O corte superior do dendograma estabelece a separação entre os dois grandes grupos de bacias: as rurais (à esquerda) e as urbanas (à direita). Com base no corte inferior é possível subdividir os grupos. Assim, as bacias rurais dividem-se em agrícolas (Trancão (B), Loures, Trancão (SB) e Fanhões) e em florestais (Vinhas e Colares). Já as bacias urbanas são subdivididas em função do seu grau de edificação, isto é, um grupo é formado pelas bacias cujo estado de urbanização está mais avançado (Póvoa e Laje) e o outro grupo é composto pelas bacias onde esse processo ainda não está tão desenvolvido (Jamor, Caparide e Barcarena). Relativamente a Alpriede junta-se ao grupo das bacias urbanas numa fase posterior devido à sua ocupação florestal/silvestre (ainda) extensa.

### 3. AVALIAÇÃO DOS FACTORES CONDICIONANTES

Com a análise e a contabilização dos valores dos índices, tanto dos factores físicos, como dos factores variáveis, chega-se aos resultados finais da susceptibilidade às cheias das onze bacias estudadas. Os resultados de cada bacia em cada componente estão expressos no quadro 24. O ISfc (índice de susceptibilidade dos factores condicionantes) foi obtido conforme explicado no ponto 2.2 do capítulo I (página 34). Os resultados finais são anunciados no quadro 25.

BACIAS HIDROGRÁFICAS	GEOMETRIA (x1)	SUBSTRATO GEOLÓGICO (x3)	RELEVO (x2)	REDE DE DRENAGEM (x1)	USO DO SOLO (x3)	TOTAL
BARCARENA	1,0	8,0	2,8	1,5	9,0	22,3
CAPARIDE	1,3	3,0	6,8	1,3	9,8	22,1
COLARES	4,0	5,0	5,6	2,3	3,8	20,6
JAMOR	1,8	7,0	2,8	2,0	9,0	22,6
LAJE	1,5	3,0	2,0	1,0	12,0	19,5
VINHAS	2,3	7,0	8,0	4,0	4,5	25,8
ALPRIATE	3,0	7,0	6,0	1,8	9,0	26,8
FANHÕES	4,0	11,0	6,8	1,0	4,5	27,3
LOURES	2,5	9,0	3,2	2,0	3,8	20,5
PÓVOA	3,8	11,0	3,2	1,0	11,3	30,2
TRANCÃO (SB)	2,3	10,0	3,2	4,0	4,5	24,0

**Quadro 24** - Valores ponderados de cada bacia para os factores condicionantes

FACTORES CONDICIONANTES		
POSIÇÃO	BACIA HIDROGRÁFICA	ISfc
1º	PÓVOA	3,02
2º	FANHÕES	2,73
3º	ALPRIATE	2,68
4º	VINHAS	2,58
5º	TRANCÃO (SB)	2,40
6º	JAMOR	2,26
7º	BARCARENA	2,23
8º	CAPARIDE	2,21
9º	COLARES	2,06
10º	LOURES	2,05
11º	LAJE	1,95

**SUSCEPTIBILIDADE ÀS CHEIAS**

	MUITO ELEVADA
	ELEVADA
	MODERADA
	REDUZIDA
	MUITO REDUZIDA

**Quadro 25** - Susceptibilidade das bacias às cheias

Pesando todos os factores condicionantes, os resultados do ISfc (quadro 25) dizem que a bacia mais susceptível às cheias é a Póvoa, que é a única que tem uma susceptibilidade muito elevada. De seguida surgem Fanhões, Alpriate e Vinhas com susceptibilidades elevadas, e Trancão (SB) com uma susceptibilidade moderada. No que diz respeito a Jamor, Barcarena e Caparide são consideradas bacias pouco susceptíveis às cheias, enquanto os valores mais baixos (susceptibilidades muito reduzidas) são os de Colares, Loures e Laje.

O facto que mais se destaca é que, nos três primeiros classificados, há três sub-bacias do Trancão (Póvoa, Fanhões e Alpriate) e que, nas cinco primeiras posições, há quatro (junta-se Trancão (SB)) (quadro 25). Assim sendo, a única bacia que contraria este domínio é Vinhas, em 4º lugar. Por outro lado, a menos susceptível das sub-bacias do Trancão é Loures, em 10º lugar. Estes resultados permitem perceber que a bacia do Trancão, e as suas sub-bacias, possuem, de facto, características que exponenciam os efeitos das precipitações intensas.

Outra situação relevante é a que acontece com a bacia da ribeira da Laje. Esta bacia é, em termos naturais, a menos susceptível às cheias rápidas (quadro 14), porém, a sua ocupação do solo torna-a muito menos permeável comparativamente às condições do seu substrato geológico, o que faz com que seja a primeira colocada no ranking dos factores variáveis (quadro 23). Apesar da acção do uso do solo, Laje fica-se pela última posição da classificação dos factores condicionantes (quadro 25), o que prova a importância decisiva das características naturais das bacias no contexto estudado.

#### **4. OS TEMPOS DE CONCENTRAÇÃO/DE RESPOSTA E OS CAUDAIS DE PONTA DE CHEIA DAS BACIAS**

O tempo de concentração de uma bacia de drenagem define-se como o tempo que uma partícula de água demora a atingir a secção de referência, partindo do seu ponto cinematicamente mais afastado (Lima J. e Lima I., 2010). Por outras palavras, é o tempo necessário para que toda a área da bacia contribua para o escoamento superficial na desembocadura (Lencastre e Franco, 2006). O tempo de escoamento de uma partícula de água depende, directamente, da extensão do percurso que essa partícula tem de percorrer e, inversamente, da velocidade de escoamento (Bichançã, 2006). Os valores do tempo de concentração são superiores em bacias alongadas e estreitas, e são menores em bacias arredondadas e com declives elevados (Ramos, 2009). Naturalmente, quanto menor for o tempo de concentração, mais perigosa se torna uma bacia em situações de cheias rápidas. Porém, trata-se sempre de uma questão de dimensão, isto é, uma bacia pequena tem um tempo de concentração/resposta mais baixo do que uma bacia grande, mas esta atinge caudais de ponta mais elevados do que a bacia menor, apesar de os atingir mais tarde. O tempo de resposta pode ser definido como o tempo que decorre entre o centro de gravidade da precipitação útil até à ponta do hidrograma (Lencastre e Franco, 2006).

Os tempos de concentração das bacias hidrográficas estudadas, obtidos através do método de Temez, e os respectivos tempos de resposta, são apresentados no quadro 26.

BACIA HIDROGRÁFICA	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	TEMPO DE RESPOSTA
BARCARENA	06h 17m	03h 47m
CAPARIDE	04h 22m	02h 37m
COLARES	05h 15m	03h 09m
JAMOR	05h 19m	03h 11m
LAJE	05h 55m	03h 33m
VINHAS	03h 41m	02h 13m
ALPRIATE	02h 56m	01h 46m
FANHÕES	03h 04m	01h 50m
LOURES	06h 41m	04h 01m
PÓVOA	04h 57m	02h 58m
TRANCÃO (SB)	08h 53m	05h 20m
TRANCÃO (B)	10h 40m	06h 24m

**Quadro 26** – Tempos de concentração (Temez) e de resposta

Começa-se por referir que a média<sup>8</sup> dos tempos de concentração é de 5h12m e a dos tempos de resposta é de 3h07m. Assim sendo, os valores assinalados a laranja são inferiores à média (quadro 26). Portanto, no que diz respeito à componente tempo, Caparide, Vinhas, Alpriate, Fanhões e Póvoa são as bacias de drenagem mais perigosas, porque são as que demoram menos tempo a atingir o caudal de ponta. Contudo, é importante não esquecer que, as quatro primeiras são aquelas que têm menores áreas. Quanto a Póvoa, existem mais três bacias hidrográficas com áreas inferiores (Barcarena, Jamor e Laje) e que têm tempos de concentração/resposta mais elevados, o que prova que não é só a área que influencia os resultados. Por exemplo, Loures tem mais do dobro da dimensão de Barcarena e os seus tempos são relativamente semelhantes.

O método de Temez é, de facto, o que apresenta os melhores resultados para esta região, mas não permite avaliar a influência da ocupação do território nos valores dos tempos de concentração. Por isso, utilizou-se também o método do FAA que, apesar de exibir erros nos resultados (por defeito), uma vez que é, por norma, aplicado em bacias totalmente urbanizadas, permite conhecer a percentagem de modificação dos tempos de concentração

<sup>8</sup> A média foi calculada sem Trancão (B).

entre datas diferentes (neste caso, entre 1990 e 2006). O quadro 27 mostra os resultados alcançados.

BACIA HIDROGRÁFICA	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO (1990)	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO (2006)	REDUÇÃO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO (1990-2006)
BARCARENA	04h 02m	03h 38m	10%
CAPARIDE	02h 37m	02h 25m	8%
COLARES	03h 01m	02h 58m	2%
JAMOR	03h 46m	03h 28m	8%
LAJE	04h 17m	03h 36m	16%
VINHAS	02h 35m	02h 31m	3%
ALPRIATE	02h 13m	02h 03m	7%
FANHÕES	02h 14m	02h 11m	2%
LOURES	05h 02m	04h 57m	2%
PÓVOA	02h 42m	02h 32m	6%
TRANCÃO (SB)	05h 19m	05h 13m	2%
TRANCÃO (B)	14h 08m	13h 42m	3%

**Quadro 27** – Tempos de concentração (método FAA) e respectivas reduções (%) entre 1990 e 2006

Mais do que os valores absolutos, interessam as percentagens de redução dos tempos de concentração das diversas bacias. Assim sendo, há uma delas que se destaca claramente de todas as outras: Laje. Fruto do aumento muito rápido das áreas edificadas e da consequente diminuição das áreas agrícolas, o tempo de concentração desta bacia baixa quase 16% em 16 anos (em média, 1% por ano). Para além desta, existem outras bacias em que se observam reduções significativas: Barcarena, Caparide, Jamor, Alpriate e Póvoa. Como seria de esperar, as diminuições são menos notórias nas bacias hidrográficas essencialmente agrícolas e florestais, já que o processo de urbanização é mais lento.

Juntamente com os tempos de concentração e de resposta é também importante fazer uma avaliação dos caudais de ponta de cheia das bacias estudadas. Tendo em conta a escassez de dados hidrométricos para a AML Norte, uma forma de obter os caudais de ponta de cheia para diversos períodos de retorno é através do método de Portela e Dias (2003). Os resultados para as bacias estudadas são enunciados no quadro 28.



BACIAS HIDROGRÁFICAS	CAUDAL DE PONTA DE CHEIA (m3/s)						
	1 ANO	2 ANOS	5 ANOS	10 ANOS	20 ANOS	50 ANOS	100 ANOS
BARCARENA	4,67	15,57	21,80	26,47	31,15	35,04	37,37
CAPARIDE	3,27	10,89	15,25	18,52	21,79	24,51	26,14
COLARES	6,05	20,17	28,24	34,30	40,35	45,39	48,42
JAMOR	5,50	18,33	25,66	31,16	36,65	41,24	43,99
LAJE	5,32	17,73	24,82	30,14	35,45	39,88	42,54
VINHAS	3,97	13,25	18,54	22,52	26,49	29,80	31,79
ALPRIATE	2,91	9,69	13,57	16,47	19,38	21,80	23,26
FANHÕES	3,80	12,68	17,75	21,56	25,36	28,53	30,43
LOURES	8,40	28,00	39,20	47,60	56,00	63,00	67,20
PÓVOA	5,62	18,72	26,21	31,83	37,45	42,13	44,94
TRANCÃO (SB)	9,98	33,28	46,59	56,57	66,55	74,87	79,86
TRANCÃO (B)	20,10	67,01	93,81	113,91	134,02	150,77	160,82

**Quadro 28** – Caudais de ponta de cheia obtidos através do método de Portela e Dias

Tomando em consideração que todas estas bacias estão inseridas na região litoral a Norte do rio Tejo (segundo a divisão em regiões homogéneas apresentadas em Portela e Dias (2003)), a única componente que faz variar os caudais de ponta de cheia é a área de cada bacia. Portanto, quanto maior for a área de uma bacia, maior será o seu caudal de ponta. Assim, os valores mais baixos são estimados para Alpriate e os mais elevados para o Trancão (quadro 28). Naturalmente que, como se viu anteriormente, existem outros factores que têm influência na magnitude dos caudais atingidos e que o método de Portela e Dias não considera. No entanto, os valores apresentados no quadro 28 servem como referência no que diz respeito aos caudais de ponta de cheia das bacias estudadas para diferentes períodos de retorno.

## 5. AS ZAC: OCUPAÇÃO E TENDÊNCIAS EVOLUTIVAS

A crescente (e muitas vezes desordenada) expansão urbana verificada ao longo das últimas décadas motivou a construção em locais susceptíveis de serem afectados por fenómenos naturais como cheias ou movimentos de vertente potencialmente perigosos. Esta realidade era, e em alguns casos ainda é, bastante evidente nas periferias da cidade de Lisboa. Ora, estas situações acarretam necessariamente um incremento da vulnerabilidade dos elementos expostos a um determinado perigo. No caso das cheias, sabe-se igualmente que a ocupação e utilização indevida dos leitos de cheia podem conduzir ao aumento da sua

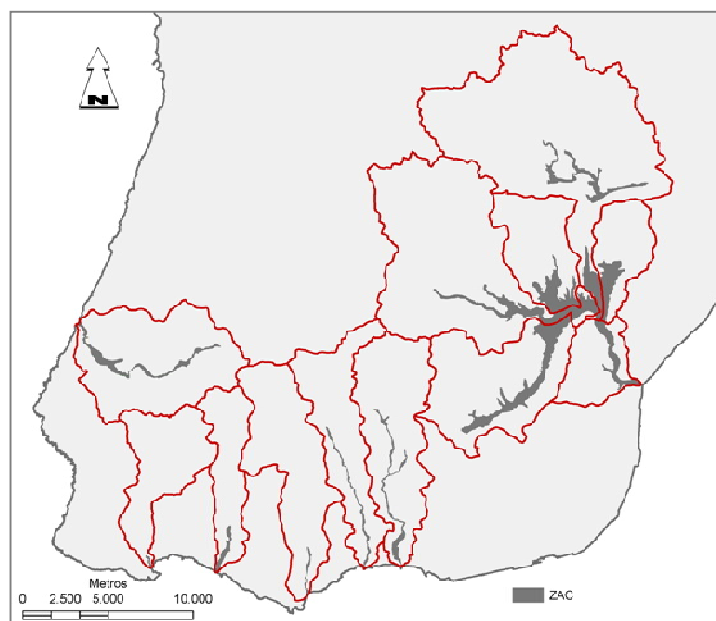


susceptibilidade/perigosidade. Assim, “as construções, para além de sujeitas aos efeitos das inundações, transformam-se em obstáculos à progressão das águas, provocando a subida do seu nível a montante e um aumento da velocidade e do potencial destrutivo da corrente” (Pereira e Ventura, 2004: p.3).

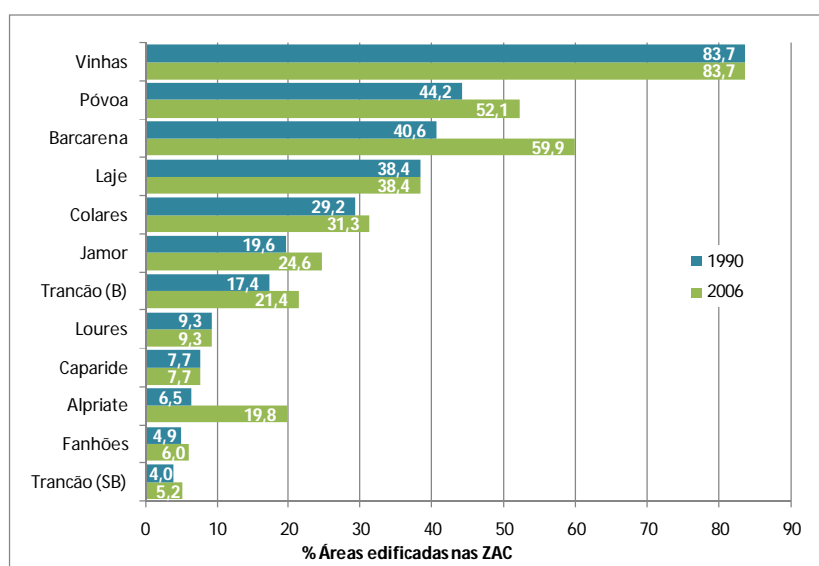
Depois de se apurarem as características e a evolução do uso solo nas bacias hidrográficas estudadas, interessa fazer igualmente a mesma análise no contexto das ZAC (Zonas Ameaçadas pelas Cheias), definidas na REN (Reserva Ecológica Nacional). Através deste tipo de análise pode perceber-se quais os tipos de ocupação possivelmente afectados aquando destes fenómenos e se são os mais adequados para ocuparem os leitos de cheia. Por outro lado, com esta avaliação observa-se se há infracções à lei, pois como define o nº1 do Artigo 20º da Lei da REN (Decreto-Lei nº 166/2008), nas áreas incluídas na REN são proibidas as acções que se traduzam em: “a) operações de loteamento; b) obras de urbanização, construção e ampliação; c) vias de comunicação; d) escavações e aterros; e) destruição do revestimento vegetal, não incluindo as acções necessárias ao normal e regular desenvolvimento das operações culturais de aproveitamento agrícola do solo e das operações correntes de condução e exploração dos espaços florestais”.

As bacias hidrográficas estudadas da AML Norte possuem fundos de vale com características diferenciadas em termos morfológicos. Deste modo, os fundos de vale das bacias que drenam para Sul são bastante mais estreitos do que os das sub-bacias do rio Trancão ou da ribeira de Colares, o que, de certa forma, condiciona a ocupação dos leitos de cheia.

Assumindo-se que os leitos de cheia devem estar ocupados por áreas verdes ou agrícolas e nunca por áreas urbanas, interessava sobretudo analisar as últimas. Para isso recorreu-se às ZAC definidas em Ramos *et al.* (2010) (figura 25). As áreas edificadas aí incluídas, em 1990 e em 2006, podem ser observadas na figura 26.



**Figura 25** – Zonas Ameaçadas pelas Cheias (ZAC), extraídas de Ramos *et al.* (2010)



**Figura 26** – Percentagem de áreas edificadas nas ZAC das bacias em 1990 e 2006

À partida, poderia esperar-se que as bacias mais urbanizadas teriam os seus leitos de cheia mais ocupados por construções. Globalmente, é esta a realidade, pois é nas bacias ditas urbanas que mais se constrói nas ZAC, enquanto nas bacias de cariz agrícola há uma menor percentagem de construções nestas áreas (figura 26). Contudo, há excepções a esta regra. Considerando o caso de Vinhas, esta é uma bacia predominantemente florestal e, apesar disso, tem quase a totalidade das suas ZAC preenchidas por edifícios (embora tenham uma dimensão reduzida) (figura 26). Por outro lado, Caparide, que é considerada uma bacia de

carácter mais urbano, tem menos de 10% das suas ZAC ocupadas por áreas edificadas (figura 26). Portanto, no que diz respeito à ocupação incorrecta das ZAC, a bacia que apresenta maiores problemas é Vinhas, seguida de Póvoa, Barcarena e Laje.

No entanto, existem determinados aspectos que é preciso considerar na análise da ocupação dos leitos de cheia. O primeiro prende-se com o facto de alguns destes cursos de água terem sectores canalizados subterraneamente, como acontece, por exemplo, na ribeira das Vinhas, que escoia sob a baixa de Cascais, ou na ribeira de Barcarena. Esta opção era muito frequente até aos anos 80 e que, entretanto, caiu em desuso. Naturalmente que, em episódios de precipitação intensa, os sistemas naturais respondem de forma diferenciada consoante as opções de planeamento e de ordenamento do território. Deste modo, as consequências serão muito menos gravosas se o leito de cheia de um curso de água estiver ocupado de forma adequada, do que for ocupado por construções ou se o curso de água estiver encanado subterraneamente.

Outra questão importante para avaliar é a natureza das áreas edificadas. Como já foi mostrado no quadro 1, existem diversas designações do Corine Land Cover incorporadas na classe das áreas edificadas, cujas características diferem. Assim, nas ZAC das bacias hidrográficas estudadas existem desde tecidos urbanos contínuos até equipamentos desportivos, culturais, de lazer e zonas históricas, o que significa que as situações são distintas em termos da exposição dos elementos em risco. Mesmo dentro desta última categoria existem espaços com características muito diversas e que, por isso, deveriam estar separados. No âmbito dos leitos de cheia, os tipos de construção fazem toda a diferença e, se os equipamentos desportivos e de lazer são perfeitamente adequados àqueles espaços, as áreas históricas não o são de todo. Como não existe essa separação, foi necessário recorrer aos ortofotomapas para perceber a natureza das áreas abrangidas pela referida categoria. Assim sendo, nas ZAC das bacias hidrográficas estudadas, essa categoria surge apenas em Jamor e em Barcarena. Na primeira bacia, corresponde ao Complexo Desportivo do Jamor e representa cerca de 41% das suas ZAC. Na segunda bacia, esta categoria corresponde a um parque urbano e representa cerca de 4% das suas ZAC, surgindo apenas na carta Corine de 2006, pois, em 1990, este espaço ainda não existia. Como as áreas referidas são espaços desportivos e de lazer, decidiu-se que estas não deveriam integrar a classe das áreas edificadas.

Relativamente à evolução das áreas edificadas nas ZAC entre 1990 e 2006, nem todas as bacias tiveram aumentos, o que se torna positivo quando se observam os incrementos verificados em algumas delas (quadro 29). Assim sendo, em Caparide, Laje, Vinhas e Loures

não se observaram aumentos das áreas construídas nas ZAC. Se se atentar na primeira coluna do quadro 29, pode verificar-se que, em Colares, Fanhões e Trancão (SB), os acréscimos não foram muito significativos. O mesmo é dizer que, em 2006, as áreas edificadas nas ZAC são apenas 1 ou 2% maiores do que eram em 1990. Por outro lado, os crescimentos em Jamor (5%), Póvoa (8%), Alpriate (13%) e Barcarena (19%) já corresponderam a números preocupantes.

BACIAS HIDROGRÁFICAS	AUMENTO DAS ÁREAS EDIFICADAS (%)	
	EM RELAÇÃO AO CONJUNTO DAS ZAC NA BACIA	EM RELAÇÃO À CLASSE DAS ÁREAS EDIFICADAS
BARCARENA	19%	48%
CAPARIDE	0%	0%
COLARES	2%	7%
JAMOR	5%	26%
LAJE	0%	0%
VINHAS	0%	0%
ALPRIATE	13%	205%
FANHÕES	1%	23%
LOURES	0%	0%
PÓVOA	8%	18%
TRANCÃO (SB)	1%	30%
TRANCÃO (B)	4%	23%

**Quadro 29** – Aumentos das áreas edificadas nas ZAC das bacias entre 1990 e 2006

Analisando a segunda coluna do quadro 29, que representa o crescimento das áreas edificadas face apenas à situação anterior desta classe, há dois tipos de evolução. Por um lado, nas duas bacias agrícolas em que as áreas construídas cresceram, Fanhões e Trancão (SB), constatarem-se aumentos de 23 e 30%, respectivamente, o que não é muito significativo já que, os números eram reduzidos na situação de partida (1990) (quadro 29 e figura 26). Por outro lado, os resultados de Póvoa (18%), Jamor (26%) e Barcarena (48%) significam que se acrescentaram mais construções onde anteriormente já existia edificação em demasia (quadro 29 e figura 26). Contudo, a expansão mais impressionante, à semelhança do que foi dito no ponto 2.1 deste capítulo, é o de Alpriate (205%). As áreas edificadas nas ZAC desta bacia eram, em 1990, comparáveis às de Caparide e de Fanhões, e, em 16 anos, essas áreas triplicaram (quadro 29 e figura 26).

Para concluir, as bacias que mais se destacam neste aspecto são: 1) Vinhas, que tem mais de 80% das suas ZAC com construções, tendo o seu troço terminal canalizado subterraneamente; 2) Póvoa e Barcarena, que, em 2006, já tinham mais de metade das suas ZAC ocupadas por áreas edificadas, e cujo crescimento parece não abrandar; 3) Alpriate, que teve um crescimento exponencial em 16 anos, triplicando a sua área construída. Naturalmente que, para se fazer uma análise mais pormenorizada das modificações do uso do solo implementadas nas ZAC, era necessário recorrer a informações com uma escala maior. Todavia, mesmo trabalhando à escala das cartas Corine (1:100 000), percebe-se perfeitamente onde estão os problemas de (des)ordenamento do território.

Como Voltaire disse um dia: “o progresso dos rios até ao oceano não é tão rápido como o do Homem para o erro”.

## **6. SÍNTESE DO CAPÍTULO II**

A análise das características físicas revelou, antes de mais, que a sua importância varia de bacia para bacia, o que se percebe tendo em conta a localização de cada uma delas dentro da AML Norte. Lembra-se de seguida as bacias hidrográficas que apresentam susceptibilidades elevadas ou muito elevadas às cheias em cada um dos factores permanentes (quadro 12). Relativamente à geometria, as bacias mais susceptíveis são Colares, Fanhões, Póvoa e Alpriate. Para o substrato geológico são Fanhões, Póvoa, Trancão (SB), Loures e Barcarena. Para o relevo são Vinhas, Caparide e Fanhões. E para a rede de drenagem são Trancão (SB) e Vinhas. Como se percebe, só há duas bacias que não possuem susceptibilidades elevadas ou muito elevadas em qualquer destas componentes (Jamor e Laje). Quando se combinam os factores permanentes, as bacias mais susceptíveis são, por esta ordem: Fanhões, Vinhas, Trancão (SB), Póvoa e Alpriate (quadro 14). No pólo oposto estão: Jamor, Barcarena, Caparide e Laje (quadro 14). Verifica-se, portanto, que, em termos naturais, as bacias que possuem susceptibilidades mais baixas são as que se localizam na costa do Estoril, com excepção de Vinhas. Pelo contrário, as que apresentam maiores valores de susceptibilidade são as sub-bacias do rio Trancão, excluindo a bacia do rio de Loures.

A expansão das áreas edificadas em algumas áreas da AML Norte, iniciada na segunda metade do século XX, possibilitou a formação de dois “mundos” antagónicos, um urbano e outro rural. Esta divisão tem tendência acentuar-se cada vez mais, uma vez que o ritmo de crescimento nas bacias ditas urbanas é substancialmente maior do que nas bacias agrícolas ou florestais. O período decorrente entre 1990 e 2006 revelou exactamente isso, isto é, as bacias

urbanizadas apresentaram uma densidade de edificação cada vez maior e as bacias rurais permaneceram rurais (figura 21 e quadro 15). Avaliando as características de cada uma das bacias concluiu-se, naturalmente, que as que apresentam maior susceptibilidade às cheias são as consideradas urbanas, com destaque para Laje, Póvoa e Caparide (quadro 23). As menos susceptíveis são as de pendor florestal ou agrícola: Fanhões, Trancão (SB), Vinhas, Colares e Loures (quadro 23).

A combinação dos factores permanentes e variáveis resultou numa classificação de susceptibilidade final que definiu as bacias que integram as 5 classes de susceptibilidade às cheias: muito elevada (Póvoa), elevada (Fanhões, Alpriate e Vinhas), moderada (Trancão (SB)), reduzida (Jamor, Barcarena e Caparide) e muito reduzida (Colares, Loures e Laje) (quadro 25).

Saliente-se também que as grandes modificações do uso do solo tiveram como consequência uma redução dos tempos de concentração das bacias, potenciando assim a sua perigosidade às cheias.

Os caudais de ponta de cheia estimados através do método de Portela e Dias permitiram estabelecer valores de referência para vários períodos de retorno em cada uma das bacias estudadas.

Finalmente, as ZAC de algumas das bacias hidrográficas estudadas continuam a representar um problema no âmbito do ordenamento do território, não só pela dimensão das áreas aí construídas, mas também porque essas áreas continuam a aumentar. Os casos mais graves observam-se nas bacias das ribeiras das Vinhas, da Póvoa, de Barcarena e de Alpriate.



### **CAPÍTULO III**

#### **FACTORES DESENCADEANTES DAS CHEIAS**

Os factores desencadeantes representam a causa imediata das cheias. A precipitação e/ou a fusão da neve afiguram-se como os factores determinantes para o ocorrência de cheias, funcionando como o mecanismo que desencadeia o fenómeno. No caso das pequenas bacias hidrográficas portuguesas, a ocorrência de caudais elevados está intimamente relacionada com a existência de precipitações intensas (Coutinho, 1984). Quando ocorrem cheias (rápidas) nas bacias da AML, estas devem-se a chuvas concentradas no espaço e no tempo, de grande intensidade, que são geradas a partir de frentes frias muito activas, de gotas de ar frio ou de células convectivas isoladas (Ramos, 2009). Como já se disse, os efeitos destas precipitações, que não duram mais do que algumas horas, podem ser agravados em função das características naturais e antrópicas das bacias (factores condicionantes).

Por outro lado, os efeitos das precipitações diferem consoante a época do ano em que ocorrem, pois, a mesma precipitação, com intensidade e duração iguais, produz caudais distintos se ocorrer no Outono ou no Inverno. Isto explica-se porque o solo apresenta diferentes graus de saturação ao longo do ano, logo, a capacidade de absorção deste varia. Assim, depois do Verão, os solos encontram-se em défice hídrico e, por isso, as primeiras chuvas do Outono servem para repor as suas reservas de água (Ramos e Reis, 2001). No Inverno, teoricamente, essa situação já não se coloca, já que as necessidades hídricas dos solos já estão salvaguardadas. Apesar da grande extensão das áreas impermeabilizadas, a influência das condições de saturação dos terrenos em situações de cheia continua a ser determinante na magnitude dos caudais de ponta (Marchi *et al.*, 2010; NOAA, 2010). Também os limiares críticos de precipitação para originar cheias diferem. Embora sejam



difíceis de estabelecer, estes são, em função das condições de saturação típicas do solo, mais baixos no Inverno do que no Outono.

Por outro lado, a conjugação das áreas das bacias hidrográficas e da duração dos eventos chuvosos também influencia a produção dos caudais de ponta de cheia. Na AML Norte as bacias são pequenas e, por isso, possuem tempos de concentração de poucas horas (quadro 26). Como tal, podem ocorrer episódios de precipitação que igualam ou excedem os tempos de concentração destas bacias, o que permite que toda a sua área contribua para o aumento dos caudais. O mesmo é dizer que, nestes casos, uma bacia atinge a sua capacidade máxima de produção de escoamento e que é capaz de gerar o seu caudal máximo na secção de referência. Evidentemente que, quanto maior for a severidade de um evento chuvoso, maior será o caudal máximo que uma bacia produz.

Por último, a repartição temporal de um episódio chuvoso de elevada intensidade é igualmente importante nas possíveis consequências que este podem causar. Ou seja, os efeitos são diferentes se o pico da precipitação ocorrer no início ou no final do período pluvioso. Deste modo, se as horas com maior intensidade de chuva forem as últimas desse período, os impactos serão maiores do que se forem as primeiras, uma vez que, quando o pico da precipitação ocorre, os terrenos já estão completamente saturados (Costa, 1986).

## **1. PRECIPITAÇÃO**

### **1.1. DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA AML NORTE**

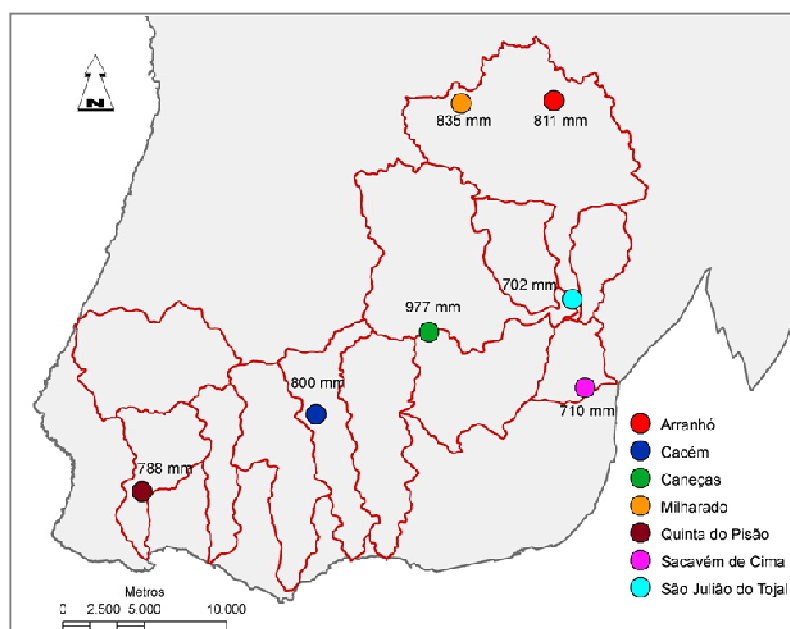
A distribuição espacial da precipitação anual depende intimamente de factores geográficos como a influência orográfica (Ferreira D.B., 2005). Na AML Norte, a presença do maciço de Sintra é determinante na repartição das chuvas, portanto, pode dizer-se que é o relevo o principal responsável pelos contrastes pluviométricos verificados nesta região.

O quadro 30 e a figura 27 mostram os valores de precipitação média anual em sete estações meteorológicas com séries de dados minimamente extensas (pelo menos 20 anos). Percebe-se que é a estação de Caneças que regista o valor mais elevado de precipitação (977 mm anuais), destacando-se de todas as outras. De seguida surgem as estações de Milharado (835 mm), Arranhó (811 mm), Cacém (800 mm) e Quinta do Pisão (788 mm). Onde se observam menores quantitativos anuais de precipitação é em Sacavém de Cima (710 mm) e em São Julião do Tojal (700 mm). Confirma-se que a questão da altitude é determinante nos valores anuais da pluviosidade, pois o coeficiente de determinação entre as duas variáveis é bastante elevado ( $r^2 = 0,85$ ) (figura 28). Trata-se de uma relação directamente proporcional,

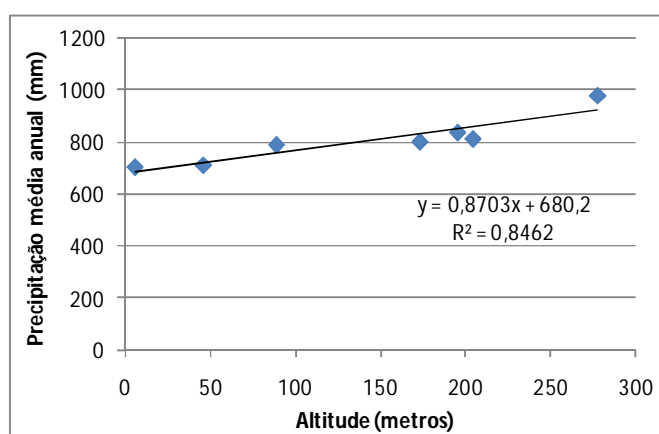
pois, em termos gerais, quanto maior for a altitude, maior será a precipitação anual. Com recurso à figura 27, constata-se ainda que a distância ao mar não exerce uma influência significativa neste aspecto.

ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL (mm)	ALTITUDE (metros)	Nº DE ANOS COM DADOS
CANEÇAS	977	277	23
MILHARADO	835	195	22
ARRANHÓ	811	204	26
CACÉM	800	173	26
QUINTA DO PISÃO	788	89	20
SACAVÉM DE CIMA	710	46	67
S. JULIÃO DO TOJAL	702	6	67

**Quadro 30** – Precipitação média anual e altitude de 7 estações meteorológicas da AML Norte

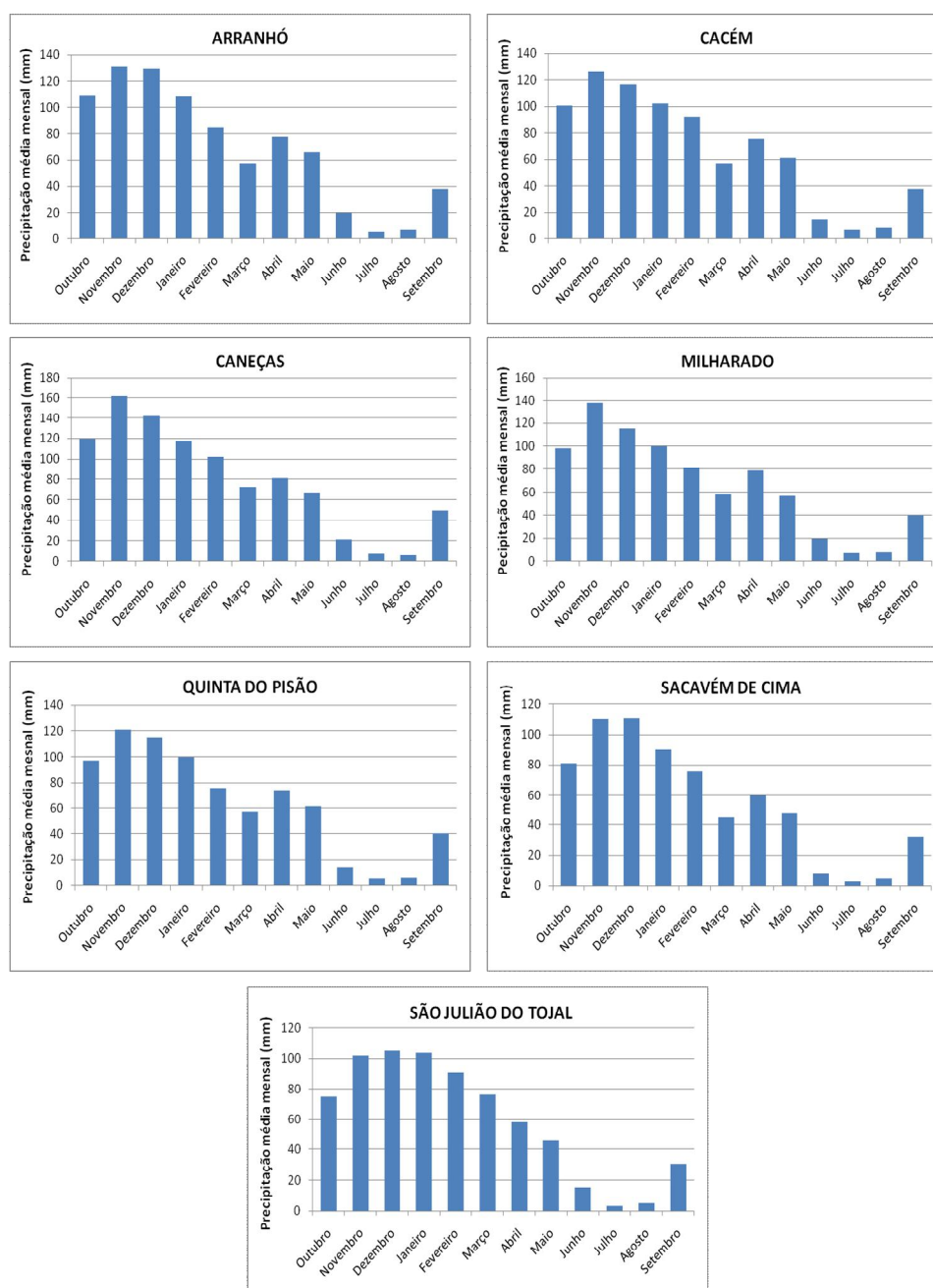


**Figura 27** – Precipitação média anual e localização das estações meteorológicas



**Figura 28** – Relação entre a precipitação média anual e a altitude das estações

A variabilidade temporal da chuva, à imagem da espacial, constitui “a expressão das características do nosso clima” (Ferreira D.B., 2005). Na AML Norte, como no resto do país, o regime da precipitação é muito irregular, tanto a nível inter-anual como inter-mensal (Ramos e Reis, 2001). Em Portugal o ritmo da precipitação ao longo do ano assume um carácter mediterrânico, cujas características se acentuam no Sul do país. Assim, este tipo de clima é marcado pela existência de uma estação quente e seca (Verão) e por um período de chuvas entre os meses de Novembro e Março (Ramos e Reis, 2001). A figura 29 mostra a repartição da precipitação ao longo do ano nas mesmas sete estações meteorológicas.



**Figura 29** – Precipitações médias mensais das estações meteorológicas

O facto mais relevante quando se observam estes gráficos é a importância assumida pelas precipitações outonais, nomeadamente em Novembro e Dezembro, em detrimento dos valores registados nos meses de Inverno (com excepção da estação de São Julião do Tojal, em que o mês de Janeiro possui valores idênticos aos dos dois meses anteriores). Esta situação faz com que a AML Norte se enquadre, relativamente ao seu regime de precipitação intra-anual, nas características da região Sul do país.

## 1.2. ANÁLISE DAS PRECIPITAÇÕES INTENSAS

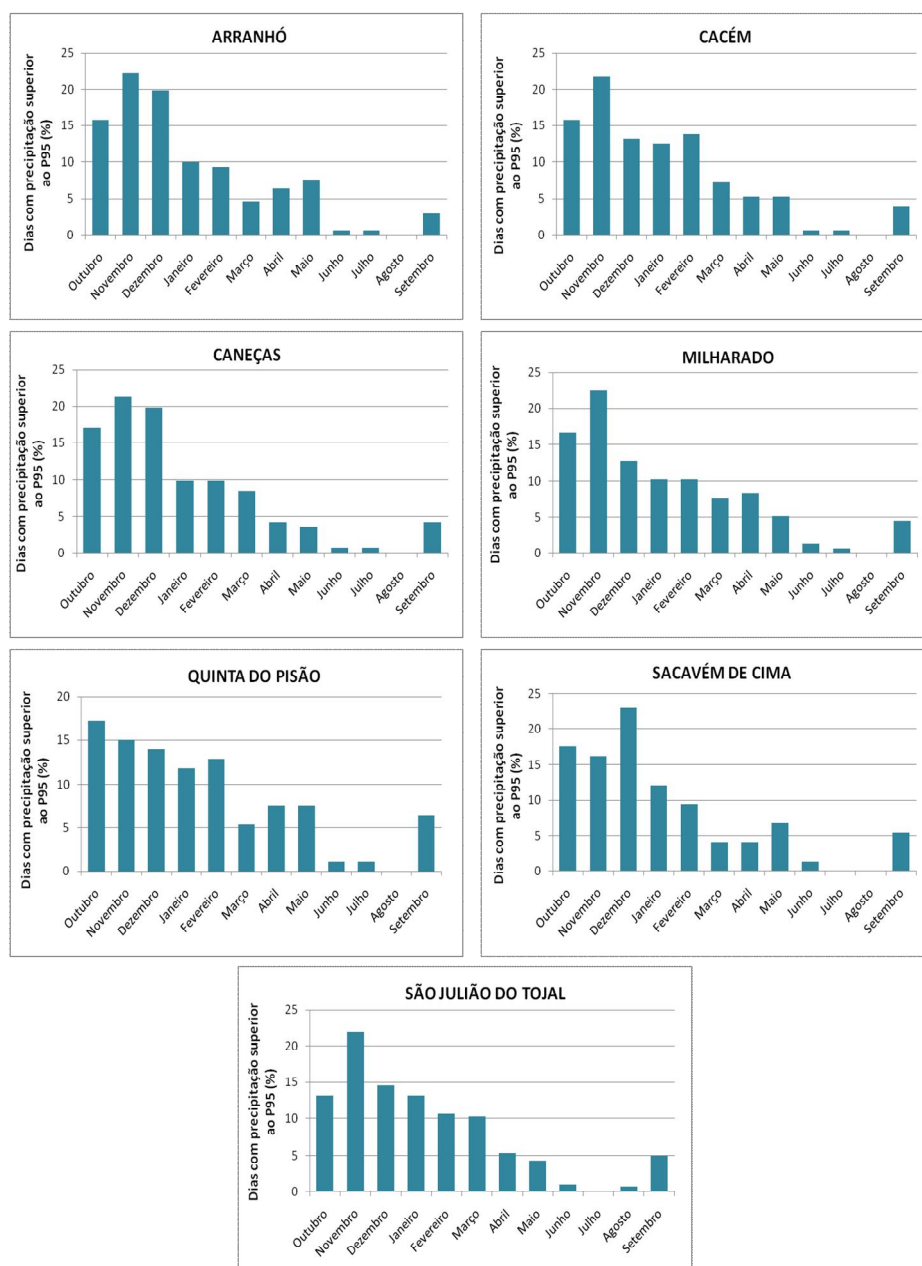
Como se pode ver no quadro 31, a extensão das séries de dados diários varia de estação para estação e, portanto, os resultados dos percentis 90 e 95 (utilizados para definir os eventos de elevada magnitude) também são diferentes. Normalmente, quanto menor for o número de dias com precipitação superior a 0,0 mm, maiores serão os resultados dos percentis. Aliás, esta tendência é confirmada no quadro 31, em que os valores mais elevados foram calculados para Sacavém de Cima, que é a estação com menos dias de chuva, e os mais baixos foram obtidos para São Julião do Tojal, que é a estação com mais dias de precipitação. A única estação que parece não se inserir nesta tendência é a de Caneças, já que os resultados dos seus percentis são mais elevados do que eventualmente se poderia esperar. Isto é, tendo em conta esta relação, os seus valores deveriam situar-se entre os resultados de Cacém e de Quinta do Pisão. Provavelmente, a explicação para este facto reside na precipitação anual, que é mais elevada do que em todas as outras estações (quadro 30).

ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	Percentil 90 (mm)	Percentil 95 (mm)	Nº de dias com precipitação > 0,0 mm	Número de dias com dados	Período de dados	Nº de dias com precipitação/nº de dias com dados
ARRANHÓ	18,8	26,5	3405	10389	1980/81 até 2009/10	33%
CACÉM	19,7	27,2	3186	10469	1979/80 até 2007/08	30%
CANEÇAS	22,6	31,2	2834	10157	1980/81 até 2009/10	28%
MILHARADO	18,4	25,4	3440	10096	1980/81 até 2008/09	34%
QUINTA DO PISÃO	20,7	28,5	1894	7943	1980/81 até 2001/02	24%
SACAVÉM DE CIMA	24,2	34,3	1461	8035	1980/81 até 2001/02	18%
S. JULIÃO DO TOJAL	18,8	27,1	5843	20348	1955/56 até 2009/10	29%

**Quadro 31** – Valores dos percentis 90 e 95 e extensão das séries de dados das estações meteorológicas

Quanto aos valores dos percentis propriamente ditos, constata-se que os resultados do P90 (percentil 90) variam entre 18,4 e 24,2 mm de precipitação diária e os do P95 (percentil

95) variam entre 25,4 e 34,3 mm (quadro 31). Importa ressaltar que, apesar da dimensão das séries de dados ser variável, o cálculo do P90 permite detectar que os valores não ultrapassam os 25 mm de precipitação diária em nenhuma das estações (quadro 31). Isto permite considerar este valor como representativo de eventos extremos em toda a AML Norte. Contudo, e dado que as séries de dados diários não são especialmente longas (à excepção de São Julião do Tojal, nenhuma das outras estações atinge os 30 anos de dados), utilizaram-se os valores do P95 (todos acima de 25 mm diários) para se perceber como se distribuem, ao longo do ano, as precipitações extremas nas diversas estações meteorológicas (figura 30).



**Figura 30** – Distribuição das precipitações intensas (acima do P95) ao longo do ano nas estações meteorológicas

Em termos gerais, os episódios pluviosos considerados extremos são fenómenos de ocorrência aleatória, apesar de terem uma maior probabilidade de ocorrerem no Outono e no Inverno (Rodrigues *et al.*, 1998). Observando os gráficos da figura 30, constata-se que estes episódios se distribuem de formas distintas ao longo do ano no contexto da AML Norte. Em primeiro lugar, algo que é comum em todas as estações é que estes eventos se repartem por quase todos os meses, sendo apenas raros em Junho, Julho e Agosto. Outro facto partilhado pelas estações é a propensão para as precipitações extremas acontecerem nos meses de Outono. Contudo, existem três tipos de distribuição dos eventos extremos. O primeiro revela uma predominância das chuvas num dos meses, que no caso de Cacém, Milharado e São Julião do Tojal ocorre em Novembro e no caso de Sacavém de Cima sucede em Dezembro. O segundo patenteia uma repartição dos eventos por dois meses (Novembro e Dezembro) e acontece em Arranhó e Caneças. O terceiro verifica-se apenas na estação de Quinta do Pisão e é marcado por uma divisão das precipitações intensas em cinco meses (desde Outubro a Fevereiro), sendo Outubro o mês que concentra mais episódios de elevada magnitude.

Comparando estes gráficos com os da figura 29 é igualmente possível perceber se os eventos extremos ocorrem nos meses com maiores valores médios de pluviosidade. O que se constata é que, em Arranhó, Cacém, Caneças e Milharado, o mês ou os meses em que a precipitação mensal é superior são os que têm mais eventos extremos. Contudo, a diferença entre esse mês/meses e os restantes é mais marcada no caso das precipitações intensas (figuras 29 e 30). Já em Sacavém de Cima e São Julião do Tojal nota-se uma predisposição para as precipitações intensas se concentrarem mais num dos meses (Dezembro e Novembro respectivamente) ao contrário dos valores mensais em que há uma maior repartição. Por último, Quinta do Pisão demonstra um comportamento das chuvas com elevada magnitude semelhante ao regime mensal, com a diferença de que as precipitações intensas tendem a diminuir ao longo do ano hidrológico. De facto, nesta estação, é em Outubro que se registam as chuvas de maior intensidade, sendo que este mês é, em termos médios, apenas o 4º mais pluvioso. Assim, o que se pode observar é que as maiores precipitações diárias tendem a ocorrer nos meses mais pluviosos, todavia, existe uma predominância de um ou dois meses no conjunto do ano hidrológico, cuja única excepção é a estação de Quinta do Pisão.

### **1.3. PERÍODOS DE RETORNO**

O período de retorno de um fenómeno hidrológico pode ser definido como o número médio de anos que decorre até que um dado valor desse fenómeno seja igualado ou ultrapassado (Brandão, 1995; Fragoso, 2003). Ou seja, um período de retorno de 100 anos

significa que um evento de determinada magnitude tem uma probabilidade de ocorrência de 1%. Isto não quer dizer que não se possam registar valores semelhantes de precipitação mais do que uma vez durante esse período de tempo.

O cálculo dos períodos de retorno da pluviosidade a nível diário foi efectuado através da lei de Gumbel, recorrendo aos dados da precipitação diária máxima anual. As estações de Arranhó, Cacém, Caneças, Milharado e Quinta do Pisão apresentam entre 20 e 26 anos de dados, enquanto Sacavém de Cima e São Julião do Tojal possuem dados para 68 e 72 anos, respectivamente (quadro 32). Como se percebe, devido ao elevado número de registos disponíveis, as duas últimas estações permitem estimar com segurança os valores de precipitação correspondentes aos vários períodos de retorno.

Atrás foi dito que uma precipitação diária de 25 mm (P90) é considerada representativa de eventos extremos na AML Norte. Ora, verifica-se no quadro 32 que, em termos estatísticos, o dobro desse valor é igualado ou excedido de 2 em 2 anos. Isto significa que uma precipitação diária de 25 mm é comum nesta região. Contudo, é preciso notar que é muito diferente se essa quantidade de chuva for registada em 2 ou 3 horas do que se repartir por 10, 15 ou 20 horas. Naturalmente que à medida que a severidade do episódio chuvoso vai aumentando, o seu grau de recorrência vai diminuindo.

ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	PRECIPITAÇÃO DIÁRIA (mm)						NÚMERO DE ANOS COM DADOS
	Período de retorno 2 anos	Período de retorno 5 anos	Período de retorno 10 anos	Período de retorno 25 anos	Período de retorno 50 anos	Período de retorno 100 anos	
ARRANHÓ	48	73	90	111	127	142	26
CACÉM	47	76	95	119	137	155	26
CANEÇAS	56	79	94	114	128	142	23
MILHARADO	53	78	95	117	132	148	22
QUINTA DO PISÃO	52	75	90	109	123	136	20
SACAVÉM DE CIMA	50	68	80	95	107	118	68
SÃO JULIÃO DO TOJAL	49	73	88	108	123	137	72

**Quadro 32** – Valores de precipitação diária para diversos períodos de retorno

Através do quadro 32 é possível analisar quais os valores de precipitação estimados para cada uma das estações meteorológicas. Assim, os resultados mais elevados para os períodos de retorno (PR) de 2 e 5 anos foram calculados em Caneças, para 10 anos no Cacém e em Milharado, e para 25, 50 e 100 anos unicamente no Cacém. Em oposição, o valor mais baixo para 2 anos foi, curiosamente, obtido no Cacém, e, para todos os restantes períodos, foi



obtido em Sacavém de Cima. No entanto, importa referir que os números estimados para os períodos de retorno mais elevados, nomeadamente para 100 anos, das cinco primeiras estações do quadro 32 não são tão fiáveis como os de Sacavém de Cima e São Julião do Tojal. Observa-se igualmente que, à medida que o período de retorno aumenta, a amplitude entre a estação com os valores mais altos e a estação com os valores mais baixos aumenta (quadro 33). Para além disso, há um outro facto relevante que o quadro 33 permite aferir: a partir dos 10 anos, a precipitação mais elevada passa a ser igual ou superior à precipitação mais baixa do período de retorno seguinte. Por exemplo, o valor mais elevado para o PR 10 anos é igual ao valor mais baixo para o PR 25 anos (95 mm).

PERÍODO DE RETORNO	PRECIPITAÇÃO DIÁRIA (mm)		AMPLITUDE ENTRE VALORES (mm)
	MAIS BAIXA	MAIS ELEVADA	
2 ANOS	47	56	9
5 ANOS	68	79	11
10 ANOS	80	95	15
25 ANOS	95	119	24
50 ANOS	107	137	30
100 ANOS	118	155	37

**Quadro 33** – Diferenças nos valores de precipitação diária entre estações para diversos períodos de retorno

Concluindo, os resultados calculados para cada período de retorno servem como referência para os valores diários de precipitação com magnitudes elevadas, permitindo avaliar a sua severidade. Por outro lado, quando se estabelece a relação entre uma cheia e o seu factor desencadeante é importante conferir o período de retorno da precipitação.

## 2. RELAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO E AS CHEIAS

“O regime dos rios portugueses depende essencialmente da variação temporal da precipitação” (Ramos e Reis, 2001). Como tal, o seu comportamento ao longo do ano é igualmente muito irregular, possuindo uma estiagem prolongada e caudais de cheia que atingem valores muito significativos (Ramos e Reis, 2001). Os escoamentos/caudais podem apresentar uma relação mais ou menos estreita com a pluviosidade consoante o grau de permeabilidade da zona vadosa e do estado de saturação dos solos. Como já se disse, este estado varia durante o ano hidrológico e, por isso, depois da estação seca, e até as

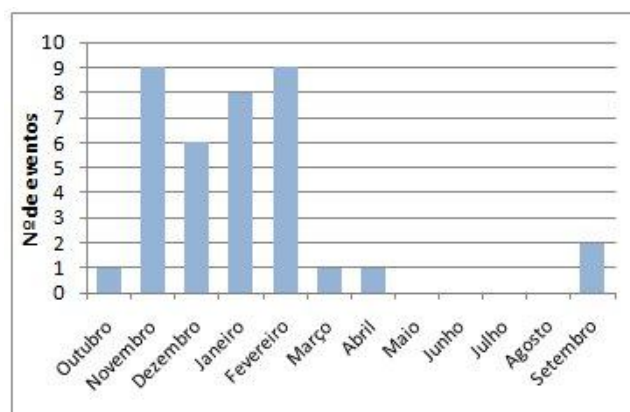


necessidades de água do solo estarem satisfeitas, as chuvas não se traduzem, normalmente, em escoamento (Ramos e Reis, 2001). Todavia, quando a intensidade pluviométrica ultrapassa a capacidade de absorção dos solos, produz-se o escoamento directo, podendo originar situações de cheias rápidas, mesmo sem os solos estarem saturados.

Quando o objectivo é estudar as cheias, uma das condições fundamentais para a realização do trabalho é uma boa qualidade dos dados hidrométricos. No entanto, isso nem sempre acontece e, quando assim é, a análise das precipitações intensas é a forma mais adequada para colmatar falhas nos registos hidrométricos em períodos de cheia (Brandão, 2005). A verdade é que, na AML Norte os dados de caudal são escassos e, por isso, o estudo das cheias é feito sobretudo com base na precipitação. Acresce ainda que, os registos horários de pluviosidade existentes para esta região ainda possuem séries curtas e, portanto, não existem dados de hora em hora para a maioria das cheias ocorridas. De notar que a existência de registos horários é de extrema importância, pois os dados diários não permitem avaliar a concentração temporal da precipitação. Por exemplo, um registo de 50 mm diários pode ou não originar cheias, depende, entre outros factores, se essa quantidade de chuva for repartida ao longo do dia ou se concentrar em poucas horas.

## **2.1. EVENTOS OCORRIDOS NAS BACIAS ESTUDADAS**

Antes de mais, é importante não esquecer que um fenómeno natural extremo só se torna uma catástrofe (natural) quando afecta habitações e/ou actividades humanas (Andjelkovic, 2001). É a partir deste pressuposto que surge o inventário das cheias ocorridas nas bacias hidrográficas estudadas. Este corresponde a uma parte de um inventário mais extenso elaborado por Quaresma (2008) para todo o país, a partir de notícias de jornais. Evidentemente que esta base de dados não abrange todas as cheias que aconteceram, apenas as que correspondem a notícias por terem causado vítimas e/ou estragos. Desde o início do século XX foram contabilizados, por aquela autora, 37 eventos de cheia nas bacias hidrográficas estudadas, cuja distribuição por meses se mostra na figura 31.



**Figura 31** – Número de eventos danosos registados em cada mês

Ao contrário do que se observou relativamente à precipitação, as cheias ocorreram tanto no Outono como no Inverno, todavia, concentraram-se essencialmente em quatro meses: Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro. Dos 37 eventos contabilizados, 32 sucederam nestes quatro meses e apenas 5 ocorreram nos restantes. Os meses em que se verificaram mais cheias foram Novembro e Fevereiro (9 eventos), seguidos de Janeiro (8 eventos) e de Dezembro (6 eventos). O facto de ocorrer um número assinalável de cheias em Fevereiro é algo interessante de analisar. Provavelmente, o número de eventos observados em Fevereiro está relacionado com as condições do solo. Nessa altura do ano os terrenos costumam estar próximo da saturação ou mesmo saturados, o que significa que não é necessária uma precipitação tão elevada para originar uma cheia. Interessante é verificar que, enquanto nos outros três meses referidos as cheias se repartiram ao longo das décadas analisadas, em Fevereiro, dos nove eventos registados, oito aconteceram a partir dos anos 60. Por outro lado, exceptuando nas cheias de 2008, as precipitações que deram origem aos eventos foram relativamente concentradas espacialmente, afectando áreas pequenas. O mesmo já não aconteceu em Novembro, pois foi nesse mês que se registaram as cheias de 1967 e 1983, em que as chuvas, para além de terem atingido intensidades elevadas, abrangeram áreas extensas. “A ocorrência nesta época do ano de grandes cheias parece estar ligada às temperaturas, ainda elevadas, das águas do Oceano Atlântico no Outono e à conexão entre a circulação polar e tropical” (Ferreira, 1980; *in* Roxo e Ventura, 1986).

O quadro 34 mostra as precipitações diárias e as precipitações acumuladas para cada evento nas várias estações meteorológicas. Não estão representadas todas as cheias do inventário, uma vez que a estação com a maior série de dados (São Julião do Tojal), só começou a funcionar em 1955. É importante referir que, como quase não existem dados horários, todas as precipitações apresentadas no quadro 34 provêm de registos diários.

Também a precipitação correspondente ao último evento (18/02/2008) é apresentada no quadro 34 com recurso aos dados diários para se poderem comparar os valores. Contudo, para esse evento existem registos horários, que serão apresentados no ponto 2.2 deste capítulo, quando se analisar mais detalhadamente essa cheia. De resto, a forma correcta de estudar as precipitações intensas que originam cheias rápidas é através dos dados horários, e o tipo de análise efectuada no ponto 2.2 é a que deve ser feita quando existem registos de hora a hora.

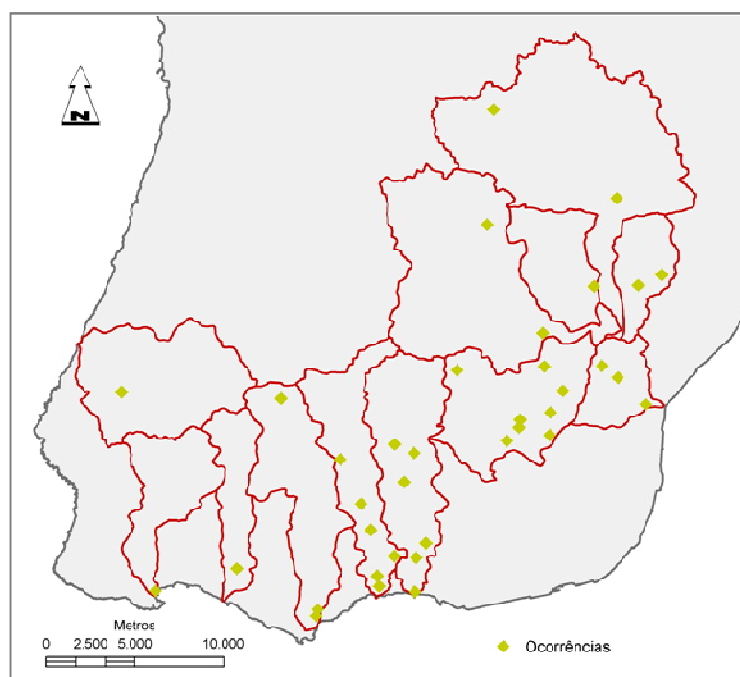
Como já se referiu, o problema dos dados diários do INAG é que correspondem ao período que decorre entre as 09h de um dia e as 09h do dia seguinte, em vez de corresponderem ao período entre as 00h e as 00h. Esta situação faz com que, muitas vezes, as precipitações que dão origem a cheias se repartam por dois registos, o que dificulta a tarefa de quem estuda estes fenómenos. Assim, no quadro 34, a coluna “P diária 1” corresponde à precipitação do dia do evento (apenas até às 9 horas da manhã desse dia) e a coluna “P diária 2” corresponde à precipitação do dia do evento somada à precipitação do dia seguinte ou do dia anterior. Porém, existem eventos em que a chuva registada no próprio dia abrange as horas de precipitação que desencadearam as cheias. Nesses casos, a segunda coluna de cada estação está preenchida a amarelo. Já a terceira coluna corresponde à precipitação acumulada desde o início do ano hidrológico até ao dia da cheia.

Como se vê no quadro 34, os registos de precipitação são bastante diferentes de cheia para cheia e, por vezes, entre estações (dependendo da distribuição espacial das chuvas). Como referem Uhlenbrook *et al.* (2002), cada cheia é única porque cada evento resulta de uma combinação entre a precipitação, as condições de humidade do solo e as propriedades da bacia hidrográfica.

DATA DO EVENTO	ARRANHÓ			CACÉM			CANEÇAS			MILHARADO			QUINTA DO PISÃO			SACAVÉM DE CIMA			SÃO JULIÃO DO TOJAL		
	p diária 1 (mm)	p diária 2 (mm)	p Acum. (mm)	p diária 1 (mm)	p diária 2 (mm)	p Acum. (mm)	p diária 1 (mm)	p diária 2 (mm)	p Acum. (mm)	p diária 1 (mm)	p diária 2 (mm)	p Acum. (mm)	p diária 1 (mm)	p diária 2 (mm)	p Acum. (mm)	p diária 1 (mm)	p diária 2 (mm)	p Acum. (mm)	p diária 1 (mm)	p diária 2 (mm)	p Acum. (mm)
03-11-1955																			41,3	88,3	24,4
30-11-1958																			28,0	50,0	25,2
14-12-1963																			40,4	70,5	417,3
15-01-1964																			28,0	61,7	567,4
24-09-1965																			39,1		388,3
15-01-1966																			37,5		476,6
12-02-1966																			25,5	43,1	640,5
19-02-1966																			59,5	94,5	730,4
25-11-1967																			137,0		170,4
09-01-1969																			15,2	66,8	499,6
11-01-1969																			26,4		566,4
19-02-1969																			11,5	42,6	767,0
21-02-1969																			3,1		785,0
03-02-1972																			44,5	84,9	263,0
26-02-1978																			38,6		669,3
10-02-1979																			40,0	66,0	721,3
30-12-1981	61,1		286,4	57,2		244,0							65,0		166,4	51,9		253,4	78,0		248,6
19-11-1983	152,3	225,3	284,9	173,8	206,3	274,9	129,0	169,2	282,2	138,0	198,5	264,5	127,5	147,5	173,6	130,9	152,5	274,7	163,7	191,1	243,6
08-01-1996	35,6	48,5	737,1	45,5	49,4	651,8	60,0		825,8	46,7		652,4	47,2		632,7	10,0	21,0	502,5	66,5		551,7
18-02-2008				120,6	136,9	186,2	98,7	117,5	325,6	48,9	64,0	223,1							140,9	150,3	219,8

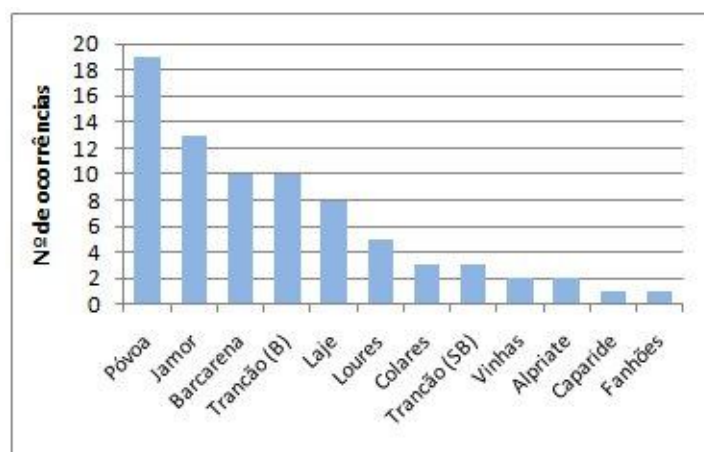
**Quadro 34** – Precipitações diárias e acumuladas de cada evento nas várias estações

Importa esclarecer que um evento pode ter uma ou mais ocorrências, consoante a magnitude e a repartição espacial das precipitações que provocam as cheias. Neste caso, as ocorrências representam o número de aglomerados populacionais onde se registaram danos (pessoais ou materiais). A figura 32 demonstra a distribuição espacial das ocorrências nas bacias hidrográficas analisadas. Essencialmente, pode ver-se que existe uma aglomeração das ocorrências em torno da cidade de Lisboa, nomeadamente nas bacias de Barcarena, Jamor e Póvoa, e também no sector jusante da bacia do Trancão. À medida que nos afastamos da capital as ocorrências diminuem. Esta distribuição depende sobretudo da localização (em leito de cheia) de parte dos núcleos suburbanos, mais do que das características das precipitações, já que há locais recorrentemente afectados pelas cheias. À ocupação indevida dos leitos de cheia que se verifica em alguns locais, acrescenta-se, frequentemente, o subdimensionamento dos sistemas de drenagem de águas pluviais. No entanto, a distribuição evidenciada na figura 32 não significa que noutros locais os cursos de água não entrem em situação de cheia, significa apenas que não houve danos a registar (ou pelo menos, que tiveram importância suficiente para serem notícia). Naturalmente que a severidade de determinado fenómeno de precipitação tem igualmente importância na distribuição e na quantidade de ocorrências. Exemplos disso são as cheias de 1967 e de 1983, em que foram contabilizadas 14 e 8 ocorrências respectivamente.



**Figura 32** – Distribuição espacial das ocorrências registadas em todas as cheias

Enquanto a figura 32 permite perceber quais os locais afectados por cheias, na figura 33 é possível observar o número de ocorrências registadas dentro de cada uma das bacias. De referir que, para Trancão (B), foram apenas consideradas as ocorrências localizadas a jusante das suas sub-bacias.



**Figura 33** – Número de ocorrências por bacia hidrográfica

Evidencia-se, em primeiro lugar, a bacia da ribeira da Póvoa em que se observaram, desde o início do século passado, 19 ocorrências em oito locais distintos. Seguem-se Jamor com 13 ocorrências em seis locais, Barcarena e Trancão (B) com 10 ocorrências em seis e três sítios respectivamente, e Laje com 8 ocorrências em três locais. Posteriormente, com menor importância neste contexto, sucedem-se Loures com 5 ocorrências em dois locais, Colares e Trancão (SB) com 3 ocorrências em um e 2 sítios respectivamente, Vinhas e Alpriate com 2 ocorrências em 1 e 2 locais respectivamente e, por fim, Caparide e Fanhões apenas com 1 ocorrência.

De seguida destacam-se as duas cheias que maiores consequências tiveram na AML Norte e que, por isso, permanecem na memória das populações afectadas: 1967 e 1983.

As cheias de 1967 sucederam na madrugada de 25 para 26 de Novembro e deveram-se a uma depressão convectiva formada na região da Madeira, que resultou da interacção das circulações polar e tropical (Amaral, 1968; Ramos e Reis, 2001). Aos seus efeitos juntaram-se ainda os de uma frente fria muito activa proveniente dos Açores (Noroeste) e os de uma advecção de ar quente dirigida pelo *jet* subtropical vinda de Sudoeste (Ferreira, 1985). Isto fez com que a depressão se deslocasse para Nordeste em direcção à região de Lisboa, originando precipitações muito elevadas. Entre as 10h de dia 25 e as 10h de dia 26h registaram-se 109 mm na estação de Lisboa (Aeroporto), 158,7 mm na estação de Monte do Estoril (que

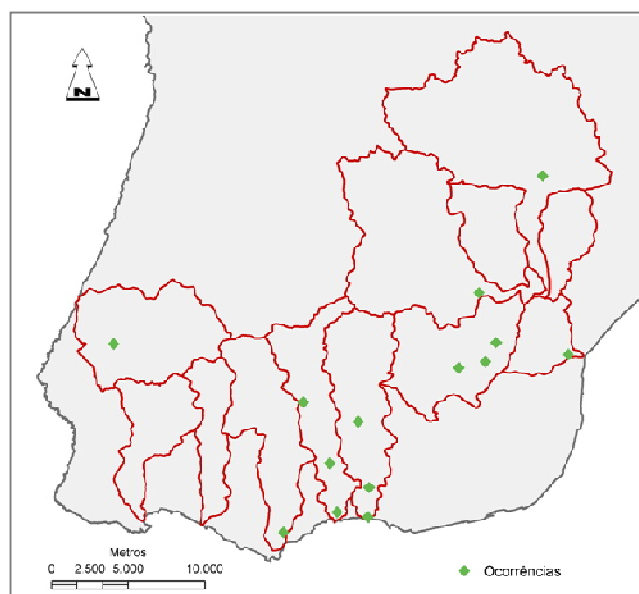
corresponde a 1/5 da precipitação anual) e 131,9 mm na estação de São Julião do Tojal (Amaral, 1968; Ramos e Reis, 2001). No período em que a precipitação atingiu a intensidade máxima (entre as 19h do dia 25 e a 1h do dia 26) verificaram-se 77,5 mm em Lisboa, 129,7 mm no Monte do Estoril e 115,3 em São Julião do Tojal (Amaral, 1968). No espaço de uma hora, observaram-se 21 mm em Lisboa (entre as 20 e as 21h), 60 mm no Monte do Estoril (também entre as 20 e as 21h) e 30 mm em São Julião do Tojal (entre as 22 e as 23h) (Amaral, 1968). De referir que, o período de retorno das chuvas que desencadearam estas cheias foi estimado na altura em 500 anos (Costa, 1986). No que se refere à estação de São Julião do Tojal, e com os dados disponíveis actualmente, o período de retorno da precipitação de 24h é da ordem dos 100 anos (quadro 32). Devido à inexistência de estações hidrométricas ou à sua destruição durante a cheia, não existem dados relativamente aos caudais atingidos (Ramos e Reis, 2001).

Estima-se que cerca de 700 pessoas tenham morrido devido às cheias de 1967 (Ramos e Reis, 2001). Estes números devem-se não só às características físicas e antrópicas das bacias hidrográficas (susceptibilidade), mas principalmente devido à elevada vulnerabilidade que estas apresentavam naquela época. Como tal, o agravamento da situação, que já era preocupante devido aos quantitativos de precipitação, deve-se a um grande número de factores. Em primeiro lugar, como afirmam Ramos e Reis (2001), a cheia tornou-se catastrófica porque ocorreu na periferia de Lisboa, numa área com elevadas densidades populacionais. Depois, como se não bastassem os elevados caudais líquidos dos cursos de água, um dos maiores problemas foi a carga sólida que estes transportaram. Isto resultou, por um lado, da destruição da vegetação em áreas declivosas e da existência de terrenos agrícolas abandonados, e, por outro, do facto de muitos bairros de génese ilegal ainda não terem as suas vias alcatroadas. Tudo isto dotou os cursos de água de grandes cargas sólidas que atingiram as habitações clandestinas instaladas nos leitos de cheia. Também alguns prédios construídos na margem do leito menor das ribeiras ruíram por sapamento lateral (Ramos e Reis, 2001). Para além disso, a insuficiência e a inadequação da rede de drenagem de águas pluviais, tal como, a presença de aterros transversais às linhas de água, contribuíram para o agravamento dos efeitos da cheia (Amaral, 1968).

As precipitações intensas que deram origem às cheias abrangeram uma área relativamente extensa da AML Norte (figura 34), dando origem a 14 ocorrências (Colares, Oeiras, Cacém, Barcarena, Caxias, Cruz Quebrada, Linda-a-Pastora, Queluz, Bucelas, Loures, Odivelas, Póvoa de Santo Adrião, Olival Basto e Sacavém). Apesar de se terem verificado ocorrências em quase toda a Península de Lisboa, percebe-se que é nas bacias em torno da



capital que se observaram mais problemas (Póvoa, Jamor e Barcarena), reflectindo a maior vulnerabilidade dos seus elementos (em risco) (figura 34).



**Figura 34** – Distribuição espacial das ocorrências aquando das cheias de 1967

As cheias de 1983 foram substancialmente menos destruidoras do que as ocorridas 16 anos antes devido à redução da vulnerabilidade, já que, depois das cheias de 1967, foram removidos bairros clandestinos e obstáculos ao escoamento, e também foi produzida muita legislação de carácter regulador (Costa, 1986; Rebelo, 2008). A partir das 20h do dia 18 de Novembro até à tarde do dia seguinte verificaram-se precipitações intensas, resultantes de uma depressão muito cavada, situada a Sudoeste dos Açores, que, posteriormente se encaminhou para a Península Ibérica (Ramos e Reis, 2001). A instabilidade dessa depressão foi ainda reforçada por uma invasão de ar frio em altitude, fazendo-a evoluir em gota fria (Ramos e Reis, 2001). Os totais de precipitação do dia 19 foram de 112,1 mm (Lisboa/Portela), de 95,6 mm (Lisboa/Geofísico), de 126,6 mm (Lisboa/Gago Coutinho) e de 96,5 mm (Estoril) (Roxo e Ventura, 1986). Todavia, comparando estes valores com os da coluna “P diária 2” do quadro 34, percebe-se que estes não correspondem aos máximos de precipitação para 24h, já que, as chuvas intensas começaram ainda no dia anterior e, por isso, os valores máximos são superiores. Roxo e Ventura (1986) referem ainda que, entre as 00 e as 06h do dia 19, que foi o período correspondente ao máximo das chuvas e à génese da cheia, observaram-se 103 mm na estação de Lisboa/Portela. Costa (1986) admite que o máximo de



precipitação registado em uma hora foi de 67 mm. Para estas precipitações foi estimado um período de retorno entre 100 e 200 anos (Costa, 1986).

Esta cheia afectou, tal como a de 1967, uma área relativamente extensa (figura 35), provocando, contudo, um número de mortos muito inferior (10) (Ramos e Reis, 2001). Assim, verificaram-se 8 ocorrências (Cascais, Colares, Mem-Martins, Milharado, Loures, Odivelas, Catujal e Sacavém). Cascais, cuja baixa está construída por cima da ribeira das Vinhas, foi bastante afectada pela cheia de 1983, de tal forma que a bacia da ribeira das Vinhas atingiu um caudal de ponta de 180 m<sup>3</sup>/s (Quintela e Coutinho, 1983, *in* Ramos e Reis, 2001). Também na estação de Ponte Canas (sub-bacia do rio Trancão) o valor do caudal de ponta foi semelhante: 172,36 m<sup>3</sup>/s. No entanto, comparativamente, este registo é bem inferior, uma vez que a sub-bacia do Trancão é quase quatro vezes maior do que a bacia das Vinhas.



**Figura 35** – Distribuição espacial das ocorrências aquando das cheias de 1983

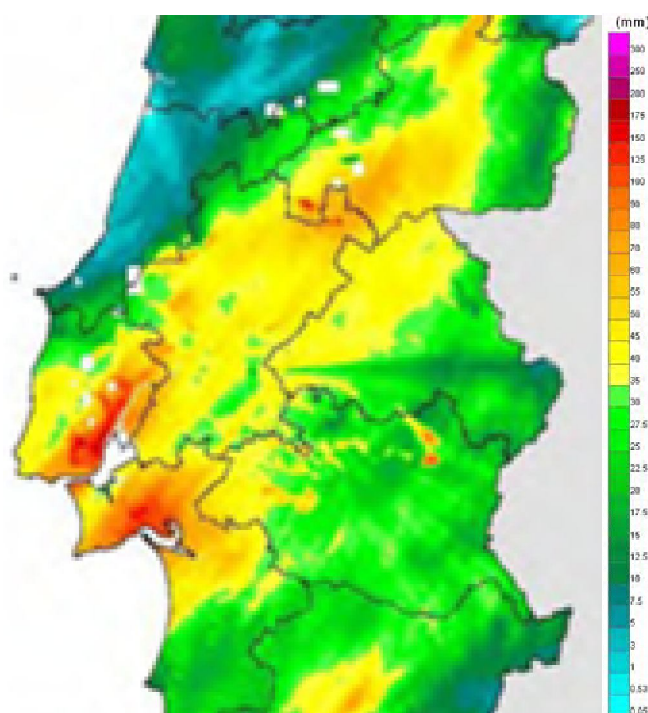
Se quisermos comparar as duas cheias, o primeiro facto que se tem de referir é que, como seria de esperar, são distintas. Portanto, em termos condicionantes e desencadeantes estes dois eventos revestem-se de características diferentes. Estes são os factos que tornaram a cheia de 67 mais perigosa do que a de 83: 1) a precipitação foi muito concentrada e intensa em poucas horas (as precipitações máximas registadas em períodos entre 2 e 6 horas foram superiores às de 83); 2) as bacias hidrográficas apresentavam uma enorme vulnerabilidade. Quanto aos factos que tornaram a cheia de 83 mais perigosa do que a de 67, estes foram: 1) as

reservas do solo já estavam preenchidas aquando da ocorrência da cheia, uma vez que a precipitação acumulada desde o início do ano hidrológico já era bastante elevada (ao contrário do que sucedeu em 67) (Roxo e Ventura, 1986); 2) as precipitações de 24h foram superiores, apesar de menos concentradas do que em 67 (quadro 34); 3) o máximo de escoamento dos cursos de água coincidiu com a maré alta, o que fez aumentar a inundação em Loures, Cascais e no vale do Jamor (Roxo e Ventura, 1986); 4) apesar de a vulnerabilidade ter diminuído face a 67, a susceptibilidade aumentou, dado que as áreas edificadas cresceram, o que fez aumentar o escoamento superficial e diminuir os tempos de concentração (embora, como já se disse, à medida que o período de retorno de um episódio de precipitação aumenta, a influência das áreas impermeabilizadas de origem antrópica diminui).

Como se vê, as duas cheias tiveram especificidades distintas e o que, certamente, desequilibra os pratos da balança a favor de 1967 é o número de mortos, reflexo da vulnerabilidade dos elementos expostos. No entanto, é impossível afirmar que uma precipitação igual à de 67 teria originado os mesmos danos (pessoais e materiais) se ocorresse 16 anos mais tarde. Ainda assim, se há algo que as duas cheias têm em comum é que ambas resultam de eventos de precipitação extrema, ambas ocorreram em Novembro e, como constatarem Rodrigues *et al.* (1998), ambas decorreram ao fim-de-semana e durante a noite.

## **2.2. AS CHEIAS DE 18 DE FEVEREIRO DE 2008**

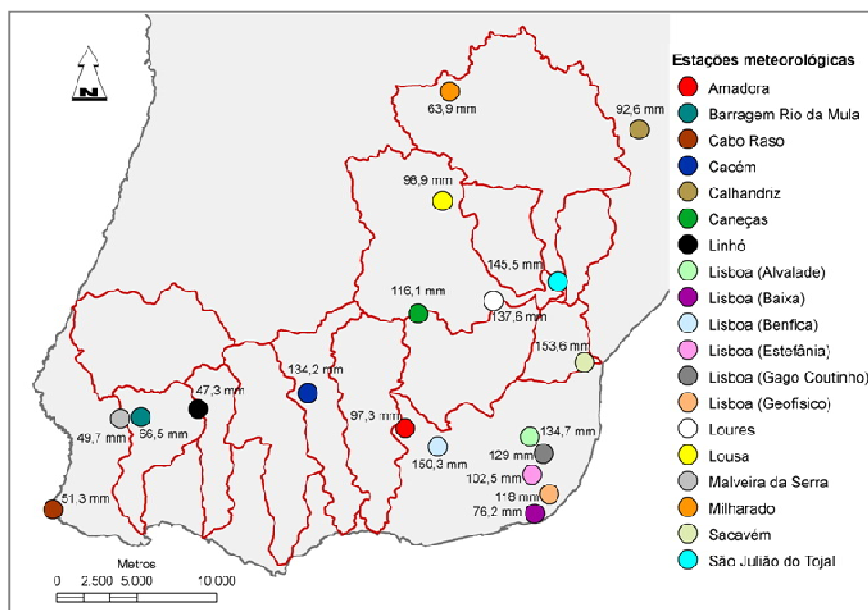
As cheias observadas no dia 18 de Fevereiro de 2008 foram provocadas por uma depressão complexa, ou seja, com vários núcleos, localizada inicialmente a Oeste da Península Ibérica (Moreira *et al.*, 2008). Numa primeira fase, em altitude, o território encontrava-se numa área situada a Norte da saída da corrente de jacto proveniente de Oeste, que, mais tarde, inflectiu para Nordeste aproximando-se do Algarve (Moreira *et al.*, 2008). Aos 850 hPa era nítido o contraste entre uma massa de ar quente e húmida (massa de ar tropical marítimo) no sector Sudeste do território e uma massa de ar fria e húmida (massa de ar polar marítimo) no sector Nordeste. Esta situação sinótica resultou na ocorrência de chuvas intensas, que caíram com maior violência na AML (Norte e Sul), progredindo depois (de Sudoeste para Nordeste) ao longo do vale do rio Tejo, embora perdendo intensidade (figura 36). A existência de muitas estações com dados horários para este evento na AML Norte permitiu avaliar com detalhe as características da precipitação no espaço e no tempo.



**Figura 36** – Intensidade da precipitação entre as 18h de dia 17 e as 18h de dia 18  
(adaptado de Moreira *et al.*, 2008: p. 11)

Este evento ficou marcado pelo seu confinamento espacial, pois concentrou-se sobretudo na região de Lisboa (Fragoso *et al.*, 2010). Assim, os maiores valores de precipitação foram registados na parte oriental da AML Norte (Lisboa, Loures e Vila Franca de Xira) (figura 36). Em três estações localizadas dentro da capital (Observatório Infante D. Luís, Lisboa (Gago Coutinho) e Lisboa (Geofísico)), os máximos de precipitação diários foram os mais elevados desde que existem registos (Moreira *et al.*, 2008; Fragoso *et al.*, 2010). O mesmo não aconteceu nas áreas suburbanas e rurais, onde os máximos diários mais altos foram registados em 1967 ou em 1983 (Fragoso *et al.*, 2010). No entanto, através da figura 37<sup>9</sup>, percebe-se que as precipitações máximas das várias estações não configuraram um contínuo espacial, pois é perceptível a presença de três núcleos com maiores valores: 1) Sacavém/São Julião do Tojal; 2) Lisboa (Benfica); 3) Cacém. Mas, globalmente, as precipitações foram relativamente confinadas, não afectando, pelo menos com intensidades muito elevadas, toda a AML Norte, como aconteceu em 1967 e em 1983.

<sup>9</sup> Os valores de precipitação mostrados na figura 37 correspondem a registos de estações do INAG e do Instituto de Meteorologia (IM). Estes últimos foram apresentados em Moreira *et al.* (2008).



**Figura 37** – Precipitações máximas em 24h entre os dias 17 e 18 de Fevereiro de 2008 em diversas estações da rede do INAG e do IM

Comparativamente, as características das precipitações que desencadearam as cheias de 2008 são algo diferentes das que se verificaram quer em 67, quer em 83. No âmbito geral, apresentaram uma magnitude inferior, como se pode ver no quadro 35<sup>10</sup>. Isso é confirmado através dos períodos de retorno calculados para algumas estações com dados horários. Assim, o período de retorno da precipitação verificada em 24 horas na estação do Cacém é inferior a 50 anos, em Caneças é inferior a 25 anos e em Milharado está compreendido entre 2 e 5 anos (quadro 32). Contudo, em São Julião do Tojal, o período de retorno foi estimado em 160 anos e no Observatório Infante D. Luís em 220 anos (Fragoso *et al.*, 2010). Também na estação de Lisboa (Geofísico), o período de retorno calculado por Moreira *et al.* (2008) é muito elevado (225 anos).

CHEIAS	MÁXIMO DE PRECIPITAÇÃO (mm)		
	1h	6h	24h
1967	60,0	129,7	158,7
1983	67,0	103,0	173,8
2008	35,3	99,7	153,6

**Quadro 35** – Máximos de precipitação registados nas cheias de 1967, de 1983 e de 2008

<sup>10</sup> Os valores apresentados no quadro 35 foram registados em diversas estações. Em 1967, todos os registos são da estação de Monte do Estoril. Em 1983, o máximo de precipitação de 1h é referido por Costa (1986), mas não é mencionada a estação onde o valor foi observado; para 6h o máximo registou-se na estação de Lisboa (Portela); para 24h o valor é o da estação do Cacém (quadro 34). Em 2008, os máximos observaram-se em Lisboa (Geofísico) (1h), em Lisboa (Benfica) (6h) e em Sacavém (24h).

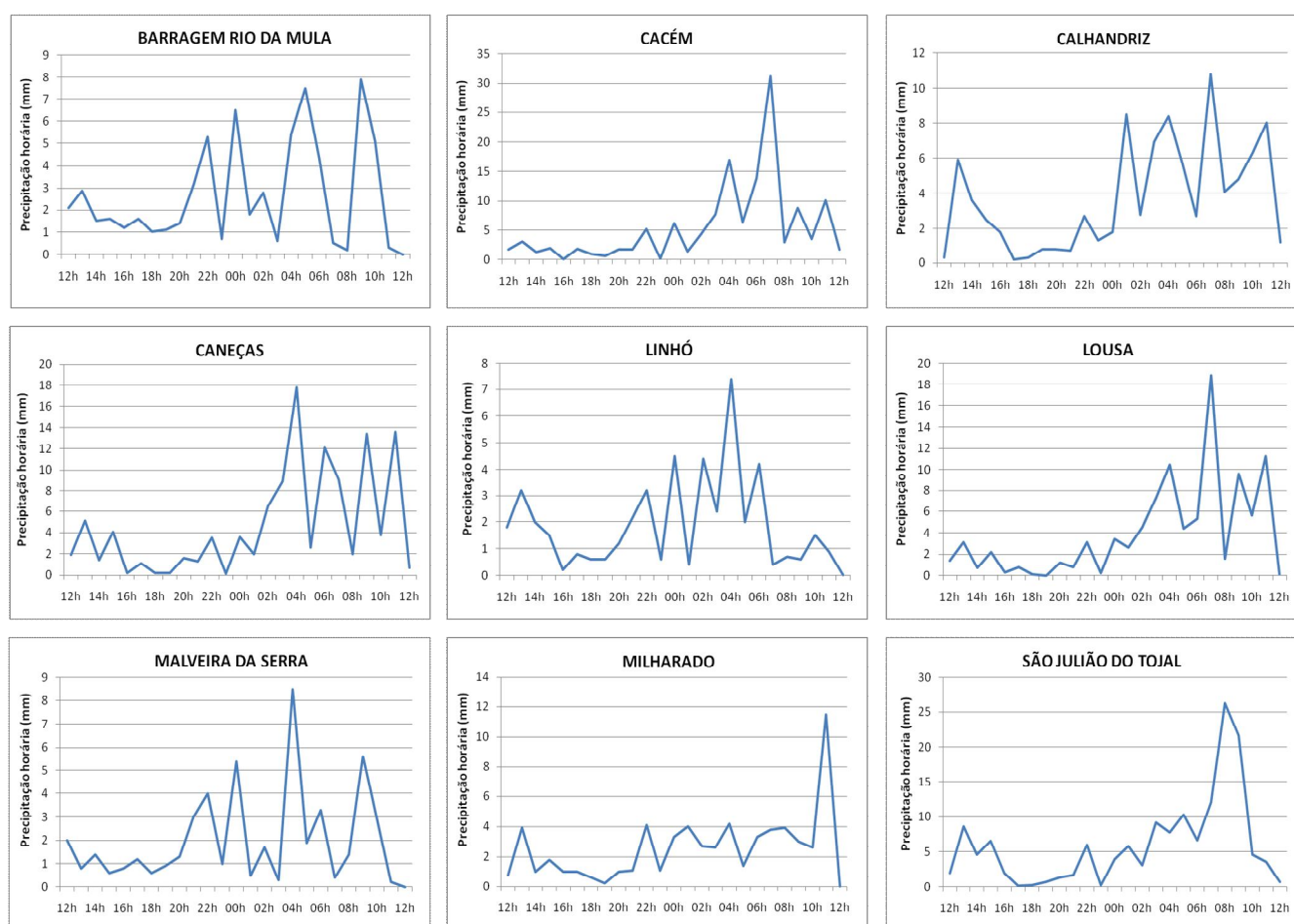
Os quantitativos de precipitação são abordados com maior detalhe de seguida. Como se pode observar no quadro 36, os valores registados diferem bastante de estação para estação. Por outro lado, não há nenhuma delas que detenha o valor de precipitação mais elevado em mais do que um período, o que espelha a aleatoriedade do fenómeno em causa. Deste modo, para 1h os registos variaram entre 5,1 e 35,3 mm. Para 3h os valores estiveram compreendidos entre 12,3 e 60 mm. Para 6h houve uma variação entre 19,9 e 99,7 mm. Para 24h os valores variaram entre 47,3 e 153,6 mm. Confirma-se então que, apesar de os máximos em cada período na AML Norte nunca se terem verificado na mesma estação, ocorreram sempre na área oriental da Península de Lisboa, assim como os mínimos se observaram na parte ocidental (figura 37 e quadro 36).

ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	MÁXIMO DE PRECIPITAÇÃO (mm)			
	1h	3h	6h	24h
AMADORA*	13,5	32,2	60,3	97,3
BARRAGEM RIO DA MULA	7,9	17,2	25,8	66,5
CABO RASO*	5,1	12,3	19,9	51,3
CACÉM	31,2	51,5	80,6	134,2
CALHANDRIZ	10,8	21,0	38,6	92,6
CANEÇAS	17,8	32,5	57,0	116,1
LINHÓ	7,4	14,2	21,1	47,3
LISBOA (ALVALADE)*	29,8	53,3	79,2	134,7
LISBOA (BAIXA)*	19,6	32,9	45,6	76,2
LISBOA (BENFICA)*	30,0	52,6	99,7	150,3
LISBOA (ESTEFÂNIA)*	29,6	47,4	63,7	102,5
LISBOA (GAGO COUTINHO)*	30,0	52,4	83,9	129,0
LISBOA (GEOFÍSICO)*	35,3	54,1	68,5	118,0
LOURES*	15,6	40,3	76,6	137,6
LOUSA	18,9	30,1	52,3	98,9
MALVEIRA DA SERRA	8,5	13,7	21,1	49,7
MILHARADO	11,5	17,1	28,1	63,9
SACAVÉM*	24,0	50,9	95,5	153,6
SÃO JULIÃO DO TOJAL	26,2	60,0	84,8	145,5

**Quadro 36** – Máximos de precipitação registados em diversas estações (as estações assinaladas com um asterisco são da rede do IM e a amarelo estão marcadas as precipitações máximas em cada duração)

O que também reflecte a aleatoriedade do fenómeno pluvioso é a informação patente na figura 38. Esta figura mostra a evolução da precipitação entre as 12h de dia 17 e as 12h de dia 18 em 9 estações da rede meteorológica do INAG. A primeira conclusão que se pode retirar, e que é comum a todas as estações, é que choveu praticamente durante as 24 horas (figura 38). Globalmente, as precipitações mais intensas decorreram durante a madrugada e a manhã do dia 18, sendo que, a forma como a chuva se distribuiu durante esse período é que

variou consoante a estação. O que é certo é que em nenhuma delas houve um aumento progressivo da precipitação ao longo das horas, mas sim uma grande oscilação ao longo do tempo, que resulta na formação de vários picos de maior ou menor intensidade (figura 38). Fragoso *et al.* (2010) chegam mesmo a referir que, o facto mais surpreendente deste evento foi a natureza irregular da precipitação horária, havendo curtos períodos de precipitação intensa, alternados com aguaceiros mais fracos. Estas características estão associadas ao regime convectivo das sucessivas faixas de chuva intensa (Fragoso *et al.*, 2010). Há, no entanto, algumas estações, como Cacém e São Julião do Tojal, em que há claramente um pico de precipitação (bastante elevado) que se destaca (figura 38). Desta distribuição temporal resulta igualmente que, o maior valor de precipitação ocorreu a horas diferentes em cada estação. Por exemplo, a hora em que mais choveu em Caneças foi às 04h, em São Julião do Tojal foi às 08h e em Barragem Rio da Mula foi às 09h (figura 38).



**Figura 38** – Distribuição da precipitação entre as 12h de dia 17 e as 12h de dia 18

Um outro dado importante que interessa analisar é a precipitação acumulada desde o início do ano hidrológico. Como se vê no quadro 34, até à data do evento, o ano estava a ser relativamente seco. Por exemplo, na estação do Cacém choveu quase tanto em 24 horas (quadro 36) como nos meses anteriores (quadro 34). Esta situação comprova que os solos estavam longe de estar saturados, até porque, nos 12/13 dias anteriores, praticamente não tinha chovido.

Relativamente às ocorrências resultantes das cheias, não foram aferidas no estudo de Quaresma (2008), uma vez que o seu inventário termina em 2006. Porém, o balanço final da Autoridade Nacional de Protecção Civil apontou para 3 mortos (2 no rio Jamor – Belas - e 1 em Frielas), 5 feridos, 179 desalojados e 122 deslocados. Também se registaram cheias em outras bacias hidrográficas, como por exemplo em Barcarena e na Laje. Para além disso, as chuvas fortes provocaram ainda diversas inundações urbanas (na cidade de Lisboa e nos seus arredores), assim como cortes de estradas e no abastecimento de energia eléctrica.

De facto, as consequências foram bem menores do que as constatadas nas outras duas grandes cheias, o que reflecte a diminuição acentuada da vulnerabilidade das bacias hidrográficas face a 1967 e a 1983. Contudo, se a vulnerabilidade era menor, a susceptibilidade era superior, pelo menos no que diz respeito às áreas edificadas. A expansão das superfícies impermeabilizadas tem sido crescente, o que acarreta os efeitos referidos anteriormente.

Devido à falta de dados hidrométricos nas várias bacias, os resultados dos caudais de ponta de cheia foram obtidos, através do Método Racional, com recurso aos dados de precipitação horária de 8 estações (quadro 37): Malveira da Serra, Barragem Rio da Mula, Linhó, Cacém, Caneças, Lousa, Milharado e Calhandriz. Optou-se pela não inclusão da estação de S. Julião do Tojal, uma vez que esta já se situa no sector jusante na bacia do Trancão, não sendo, por isso, representativa para o cálculo do escoamento por ela produzido. Para além disso, o coeficiente de escoamento superficial (ponto 2.2 do capítulo I, p. 36) foi definido com base na informação das cartas Corine de 2006.



BACIAS HIDROGRÁFICAS	Precipitação com duração igual ao TC (mm)	Precipitação com duração igual ao TC (mm/h)	Caudal de ponta de cheia (m3/s)
BARCARENA	81,5	12,9	65,34
CAPARIDE	17,8	4,1	10,61
COLARES	16,9	3,2	17,78
JAMOR	52,5	9,9	56,43
LAJE	80,2	13,6	82,67
VINHAS	17,6	4,8	15,03
ALPRIATE	20,7	7,0	14,25
FANHÕES	30,5	9,9	28,29
LOURES	58,4	8,7	68,25
PÓVOA	50,1	10,1	74,00
TRANCÃO (SB)	36,0	4,1	51,67

**Quadro 37** – Caudais de ponta de cheia estimados nas várias bacias para o evento de 18/02/2008

É importante relembrar que a distribuição da precipitação esteve longe de ser uniforme na AML Norte, o que explica os valores de caudal de ponta aparentemente baixos nas bacias localizadas mais a Oeste (figura 37 e quadro 37).

Tendo em consideração a evolução do uso do solo no período estudado (1990-2006), efectuou-se uma tentativa de avaliação do impacte produzido por essa mudança nos caudais de ponta de cheia. Isso foi feito com base no pressuposto seguinte: se as mesmas precipitações que ocorreram no evento de 2008 (com os mesmos valores e a mesma distribuição espacial e temporal) tivessem ocorrido em 1990, quais seriam as diferenças nos caudais de ponta produzidos pelas diversas bacias? Esse exercício teórico está demonstrado no quadro 38.

BACIAS HIDROGRÁFICAS	Caudal de ponta (m3/s) (1990)	Caudal de ponta (m3/s) (2006)	Aumento do caudal de ponta (m3/s)	Aumento do caudal de ponta (%)
BARCARENA	57,73	65,34	7,61	13%
CAPARIDE	9,36	10,61	1,26	13%
COLARES	17,20	17,78	0,58	3%
JAMOR	49,69	56,43	6,74	14%
LAJE	65,58	82,67	17,09	26%
VINHAS	14,29	15,03	0,73	5%
ALPRIATE	12,47	14,25	1,78	14%
FANHÕES	27,21	28,29	1,08	4%
LOURES	66,00	68,25	2,24	3%
PÓVOA	69,55	74,00	4,46	6%
TRANCÃO (SB)	50,19	51,67	1,48	3%

**Quadro 38** – Aumento dos caudais de ponta de cheia devido à expansão urbana entre 1990 e 2006



Em todas as bacias os resultados aumentam entre 1990 e 2006, dado que, como foi dito no ponto 2.1 do capítulo II, há uma expansão das áreas edificadas. Como seria de esperar, o aumento dos caudais de ponta é mais elevado nas bacias onde o crescimento urbano foi mais rápido. Destaca-se, essencialmente, a bacia da ribeira da Laje (26%), seguida de Alpriate e Jamor (14%) e de Barcarena e Caparide (13%) (quadro 38). Quanto às restantes, as percentagens variam entre 3 e 6%, correspondendo às bacias predominantemente agrícolas e florestais. A única excepção é a bacia da ribeira da Póvoa, cuja expansão urbana abrandou no período que decorreu entre 1990 e 2006.

### **3. SÍNTESE DO CAPÍTULO III**

A distribuição espacial da precipitação anual na AML Norte está muito relacionada com o relevo, já que os maiores registos anuais se verificam nas estações instaladas a uma maior altitude (quadro 30). Quanto à repartição temporal das chuvas, confirmou-se que, tanto o seu regime inter-anual como intra-anual, são bastante irregulares. Ao longo do ano, os maiores valores mensais, tal como os eventos extremos (acima do P95), tendem a ocorrer nos meses de Outono, principalmente em Novembro e Dezembro (figuras 29 e 30). O cálculo do P90 permitiu também considerar 25 mm de precipitação diária como um valor referência para os episódios extremos. Concluiu-se também que, estatisticamente, de 2 em 2 anos ocorrem chuvas diárias a rondar 50 mm, enquanto 100 mm são, normalmente, ultrapassados de 25 em 25 anos (quadro 32). Relativamente ao período de retorno de 100 anos, na AML Norte os valores diários variam entre 118 e 155 mm (quadro 32).

Quando se analisam os eventos de cheia percebe-se, antes de mais, que a altitude não influencia em nada a repartição espacial do factor desencadeante (precipitação). Desde o início do século passado ocorreram nesta região 37 eventos que se repartiram maioritariamente entre Novembro e Fevereiro (figura 31). Constatou-se igualmente que houve um maior número de ocorrências nas bacias hidrográficas mais próximas da cidade de Lisboa (Póvoa, Jamor e Barcarena), devido, essencialmente, à elevada vulnerabilidade apresentada (figuras 32 e 33). Vulnerabilidade essa que ficou bem patente aquando das cheias de 1967, e que diminuiu consideravelmente após essa catástrofe, como provaram as cheias ocorridas em 1983. Essa redução resultou, fundamentalmente, do desaparecimento dos bairros de barracas instalados nos leitos de cheia e da implementação de medidas estruturais (diques de protecção das margens das ribeiras, aprofundamento e alargamento dos canais, etc.). Também as

características da precipitação e as condições dos terrenos foram relativamente distintas nessas duas datas, comprovando que não há duas cheias iguais.

Analisado com maior detalhe foi o evento de 2008, cuja precipitação desencadeante revelou uma maior intensidade na região de Lisboa (figuras 36 e 37). No entanto, as chuvas não foram contínuas nem a nível espacial, porque houve pequenos núcleos onde se registaram valores mais elevados, nem a nível temporal, já que, na maioria das estações, observaram-se diversos picos de precipitação com o decorrer das horas (figuras 37 e 38). As consequências pessoais e materiais foram bem menores quando comparadas com as que ocorreram em 1967. Porém, um evento de precipitação com estas características continua a causar, na AML Norte, um número significativo de inundações urbanas e outros constrangimentos que poderiam ser evitados ou, pelo menos, minimizados.



## CONCLUSÃO

As cheias rápidas que ocorrem na AML Norte estão, essencialmente, dependentes das características das precipitações que lhes dão origem (factores desencadeantes). No entanto, as condições naturais e/ou antrópicas (factores condicionantes) das bacias hidrográficas estudadas favorecem o desenvolvimento das cheias.

Verificou-se que é nos meses de Outono (Novembro e Dezembro) que tendem a ocorrer os episódios de precipitação intensa. O valor de 25 mm diários foi considerado como referência na AML Norte para os eventos extremos, sendo que 50 mm por dia são atingidos, estatisticamente, de 2 em 2 anos e uma precipitação de 100 mm/dia apresenta um período de retorno de cerca de 25 anos.

Já os eventos de cheia com carácter danoso repartiram-se, maioritariamente, entre Novembro e Fevereiro, o que prova a influência significativa das condições de humidade do solo no desencadeamento destes fenómenos. A nível espacial, foi na envolvente da cidade de Lisboa (bacias da Póvoa, Jamor e Barcarena) que se registaram mais ocorrências, o que revela a grande vulnerabilidade aí existente, especialmente, há algumas décadas.

No caso das cheias de 2008 as chuvas atingiram maiores intensidades em Lisboa e nos seus arredores mais próximos, não sendo, porém, um fenómeno contínuo nem do ponto de vista espacial, nem temporal. Assim, os máximos de precipitação em 24 horas permitiram verificar a existência de núcleos de precipitação mais elevados relativamente a áreas próximas (Sacavém/São Julião do Tojal, Lisboa (Benfica) e Cacém). Constatou-se igualmente que a precipitação apresentou variações ao longo das horas, observando-se vários picos na maioria das estações da AML Norte durante o período de tempo considerado. Comparando as precipitações deste evento com as de 1967 e de 1983, percebe-se a sua menor magnitude. No entanto, é importante relembrar que não existem duas cheias iguais, porque um fenómeno de

precipitação nunca é igual a outro e a conjugação das suas características com as condições dos solos num determinado evento nunca se repete. Também a vulnerabilidade em 2008 era menor do que em 1983, mas, sobretudo, do que em 1967, o que se reflectiu nas consequências humanas e materiais.

Apesar de a precipitação ser o factor determinante para a ocorrência destes fenómenos, a forma como as bacias da AML Norte respondem às chuvas intensas difere em função das suas características naturais e antrópicas, o que faz com que a susceptibilidade às cheias seja distinta.

A avaliação das componentes permanentes comprovou que a influência de cada uma delas no agravamento destes fenómenos varia de bacia para bacia. Assim sendo, é possível identificar quatro grupos de bacias no que diz respeito às similitudes das suas características físicas. O primeiro agrupamento, em que se destaca a importância da geometria e do substrato geológico, é constituído por Fanhões e Póvoa. O segundo grupo, composto por Colares, Trancão (SB) e Alpriate, está próximo do primeiro, uma vez que a geometria ou o substrato geológico exercem uma forte influência na resposta destas bacias à precipitação. Desta forma, Colares e Alpriate partilham a relevância do factor geometria com Fanhões e Póvoa, enquanto no Trancão (SB), o factor substrato geológico é determinante em situações de precipitação intensa. O terceiro grupo, formado por Vinhas e Caparide, é claramente marcado pela influência do relevo, e o último agrupamento (Loures, Jamor, Barcarena e Laje) não possui nenhuma componente que se destaque de forma evidente das restantes. Desta forma, exceptuando no caso do segundo grupo, a proximidade/vizinhança entre bacias é fundamental na definição destes conjuntos.

A conjugação dos factores naturais revelou que o grau de susceptibilidade é muito elevado em Fanhões e Vinhas; é elevado em Trancão (SB), Póvoa e Alpriate; é moderado em Colares e Loures; é reduzido em Jamor, Barcarena e Caparide; e é muito reduzido na Laje. Deste modo, percebe-se que, das 5 bacias com susceptibilidades elevadas ou muito elevadas, 4 são sub-bacias do Trancão, sendo Vinhas a única excepção. Por outro lado, as que apresentam susceptibilidades reduzidas ou muito reduzidas são as bacias alongadas da costa do Estoril. Assim sendo, a localização das bacias acaba por ser determinante, já que a AML Norte não é homogénea no que diz respeito às suas características físicas, especialmente em termos de relevo e de litologia que, recorde-se, são os factores permanentes que mais influenciam o comportamento hidrológico das bacias.

A análise dos factores variáveis das bacias hidrográficas sugeriu uma clara distinção entre uma realidade urbana e outra rural. Contudo, em todas elas se verificou um crescimento

das áreas edificadas entre 1990 e 2006, que é particularmente acentuado nas bacias cujo processo de urbanização estava já mais avançado (Barcarena, Caparide, Laje, Jamor e Póvoa) e também em Alpriate, cuja expansão urbana foi brutal no período em questão. É importante referir que este desenvolvimento urbano foi efectuado, em grande parte, à custa das áreas agrícolas e menos à custa das áreas florestais e silvestres. Esta evolução reflecte-se na susceptibilidade às cheias, pois são as bacias com maiores ocupações urbanas as mais susceptíveis. Desta forma, o grau de susceptibilidade é muito elevado em Laje e Póvoa; é elevado em Caparide; é moderado em Alpriate, Barcarena e Jamor; e é muito reduzido em Fanhões, Trancão (SB), Vinhas, Colares e Loures. O facto de não existir uma classe de susceptibilidade reduzida comprova a diferença que existe um “mundo de crescimento urbano” e outro que mantém o seu carácter rural. Como tal, as 5 bacias que integram a última classe são predominantemente agrícolas ou florestais.

O índice de susceptibilidade dos factores condicionantes, que resultou da combinação entre factores físicos e variáveis, demonstrou que a bacia mais susceptível é Póvoa, que é a única a deter um grau de susceptibilidade muito elevado. De seguida, a susceptibilidade é elevada em Fanhões, Alpriate e Vinhas; é moderada em Trancão (SB); é reduzida em Jamor, Barcarena e Caparide; e é muito reduzida em Colares, Loures e Laje. Mais uma vez, os valores mais elevados encontram-se nas sub-bacias do Trancão (e em Vinhas), com a excepção de Loures que integra o grupo das menos susceptíveis às cheias. Essencialmente, percebe-se que são as condições naturais que mais determinam a resposta das bacias aos episódios de precipitação, mas a ocupação do solo pode conduzir a um agravamento (exemplo: Póvoa) ou a uma melhoria da situação (exemplos: Colares e Loures).

Contudo, há que referir que as susceptibilidades aqui definidas têm de ser observadas numa óptica de comparação entre as bacias estudadas. Ou seja, uma bacia que apresente uma susceptibilidade muito elevada no contexto da AML Norte podia não ter, necessariamente, o mesmo grau de susceptibilidade se estivesse localizada numa outra área do país. Outro aspecto que é necessário ter em conta é a escala de análise. Quando se define que uma bacia apresenta uma susceptibilidade baixa, essa condição aplica-se ao conjunto da bacia, o que não invalida que ela não possa ter pontos/troços críticos de ocorrência de cheias.

Constatou-se também que os impactes da urbanização no comportamento hidrológico das bacias hidrológicas foram bastante significativos. Como tal, entre 1990 e 2006, as reduções nos tempos de concentração e os aumentos dos caudais de ponta de cheia foram notáveis na Laje, mas também em Alpriate, Barcarena, Caparide ou Jamor. Como refere um

título particularmente sugestivo de um editorial da revista *Nature*<sup>11</sup>: “Bem-vindos ao Antropocénico”.

A questão da vulnerabilidade acaba por estar implícita quando se analisa a ocupação dos leitos de cheia. Nas bacias hidrográficas estudadas as situações mais preocupantes no que respeita à presença e evolução das áreas edificadas nas ZAC ocorrem na bacia da ribeira das Vinhas (com mais de 80% das suas ZAC com construções); nas da Póvoa e de Barcarena (em 2006 tinham mais de 50% das suas ZAC ocupadas por áreas edificadas e o crescimento parece não abrandar); e na de Alpriate (onde se registou um crescimento exponencial entre 1990 e 2006, triplicando a área construída durante esse período de tempo). Essencialmente, percebe-se que, apesar de a vulnerabilidade ser bastante inferior comparativamente ao que sucedia há algumas décadas, os fundos de vale continuam a estar ocupados indevidamente, existindo mesmo situações em que a edificação continua a aumentar, infringindo as interdições estabelecidas na lei da REN. Os resultados apresentados demonstram inequivocamente onde se cumpre e onde se desrespeita a lei. Assim, e ainda que, fruto do seu carácter suburbano, algumas destas bacias apresentem taxas de edificação elevadas, os seus leitos de cheia devem necessariamente ser salvaguardados, devendo ser utilizados para actividades compatíveis com a sua dinâmica hidrológica.

---

<sup>11</sup> *Nature*, Agosto de 2003, vol. 424, p. 709

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaral I (1968) “As inundações de 25/26 de Novembro de 1967 na região de Lisboa”, *Finisterra*, III, 5: 79-84.

Andjelkovic I (2001) *Guidelines on non-structural measures in urban flood management*. IHP-V, Technical Documents in Hydrology, nº 50, UNESCO, Paris.

Arnold C e Gibbons J (1996) Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator. *Journal of the American Planning Association*, vol. 62, 2: 243-258.

Barbosa C (2005) Segunda Residência e Cidade Difusa. X Colóquio Ibérico de Geografia - A Geografia Ibérica no Contexto Europeu, Évora.

Bichança M F (2006) *Bacias de retenção em zonas urbanas como contributo para a resolução de situações extremas: cheias e secas*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

Booth D B (1991) Urbanization and the natural drainage system – impacts, solutions, and prognoses. *The Northwest Environmental Journal*, 7: 93-118.

Brath A, Montanari A, Moretti G (2006) Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty). *Journal of Hydrology*, 324: 141-153.

Brandão C (1995) Análise de precipitações intensas. Tese de mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Brandão C e Rodrigues R (1998) *Precipitações intensas em Portugal Continental para Períodos de Retorno de 1000 anos*. Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, INAG, Lisboa.

Brandão C, Rodrigues R, Costa J P (2001) *Análise de fenómenos extremos – precipitações intensas em Portugal Continental*. Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, INAG, Lisboa.

Campana N A e Tucci C (2001) Predicting floods from urban development scenarios: case study of the Dilúvio Basin, Porto Alegre, Brazil. *Urban Water*, 3: 113-124.

Carvalho R (1998) *Hidrologia e Recursos Hídricos*, vol.1 – O Ciclo Natural da Água. Ed. Estúdios Cor, S.A., Lisboa.

Chow V T, Maidment D R, Mays L W (1988) *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.



Christofolletti A (1986) Análise Topográfica das Bacias de Drenagem. *Geociências*, 5-6: 1-29.

Correia F N (1983a) Alguns procedimentos adoptados pelo Soil Conservation Service para o estudo do impacto da Urbanização nos Caudais de Cheia. *In Seminário Contribuição para o Estudo de Métodos de Cálculo de Drenagem de Águas Pluviais em Zonas Urbanas*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa: 197-246.

Correia F N (1983b) Proposta de um Método para a Determinação de Caudais de Cheia em Pequenas Bacias Naturais e Urbanas. *In Seminário Contribuição para o Estudo de Métodos de Cálculo de Drenagem de Águas Pluviais em Zonas Urbanas*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa: 249-270.

Correia M, Portela M M, Morais J (2010) Cálculo da precipitação máxima com média duração em Portugal Continental. 10º Congresso da Água, Alvor, Algarve.

Costa, A C (2009) *Aplicação do modelo SWAT ao estudo hidrológico das bacias da costa do Estoril*. Dissertação de mestrado integrado em Engenharia do Ambiente, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Costa N M (2004) Dispersão urbana e mobilidade na Área Metropolitana de Lisboa. V Congresso da Geografia Portuguesa - Portugal: Territórios e Protagonistas, Guimarães.

Costa P C (1986) As Cheias Rápidas de 1967 e 1983 na Região de Lisboa. *In Brito R S (coord.) Estudos em Homenagem a Mariano Feio*: 601-616.

Coutinho M A (1984) Intervenção na bacia e na rede hidrográfica. Seminário sobre as cheias de Novembro de 1983, Secretaria de Estado das Obras Públicas.

Duarte A, Borges B, Ramos C, Pedro P, Pancada R (2005) Cheias rápidas em áreas urbanas e sua percepção: o caso da bacia da R<sup>a</sup> de Odivelas. X Colóquio Ibérico de Geografia, Évora.

Eze E B e Efiang J (2010) Morphometric Parameters of the Calabar River Basin: Implications for Hydrologic Processes. *Journal of Geography and Geology*, vol. 2, 1: 18-26.

Ferreira A B (2005) Formas de Relevo e Dinâmica Geomorfológica. *In Medeiros C A (dir.) Geografia de Portugal – o Ambiente Físico*. Círculo de Leitores, Lisboa: 53-255.

Ferreira D B (1985) Les depressions convectives du Bassin Atlantique Nord subtropical oriental. *Finisterra*, XX, 39: 25-45.

Ferreira D B (2005) O Ambiente Climático. *In Medeiros C A (dir.) Geografia de Portugal – o Ambiente Físico*. Círculo de Leitores, Lisboa: 305-385.

Ferreira C e Ferreira A (2010) Cheias urbanas: factores de risco e caminhos a percorrer. 16º Congresso da APDR, Universidade da Madeira, Funchal.

Fragoso M (2003) *Climatologia das precipitações intensas no Sul de Portugal*. Dissertação de doutoramento em Geografia Física, Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Fragoso M, Trigo R, Zêzere J L, Valente M A (2010) The exceptional rainfall episode registered in Lisbon in 18 February 2008. *Weather*, vol. 65, 2: 31-35

Henriques A G (1985) Cálculo de caudais de cheia em cursos de água em Portugal com base em séries de caudais instantâneos máximos anuais. *Recursos Hídricos*, vol.6, 2: 59-68.

Hipólito J R, Santos E G, Portela M M (2006) Contribuição para o estabelecimento de um factor de majoração para a fórmula racional. 8º Congresso da Água, Figueira da Foz.

Hollis G (1975) The Effect of Urbanization on Floods of Different Recurrence Interval. *Water Resources Research*, vol.11, 3: 431-435.

Kochel R C (1998) Geomorphic Impact of Large Floods: Review and New Perspectives on Magnitude and Frequency. In Baker V, Kochel R C, Patton P (eds.) *Flood Geomorphology*. John Wiley and Sons, New York: 169-188.

Langhammer J e Vilímek V (2008) Landscape changes as a factor affecting the course and consequences of extreme floods in the Otava river basin, Czech Republic. *Environmental Monitoring and Assessment*, 144: 53-66.

Lavrador-Silva A (2002) Avaliação das paisagens da bacia hidrográfica da ribeira de Colares: estudo geográfico e de percepção ambiental. Tese de mestrado em Geografia Física e Ambiente, Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Lencastre A e Franco F M (2006) *Lições de Hidrologia*. Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Leopold L (1968) Hydrology for Urban Land Planning – A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use. Geological Survey Circular 554, United States Department of the Interior.

Lima J e Lima I (2010) Conceitos Básicos de Hidrologia. In Lima J (coord.) *Hidrologia Urbana – Conceitos Básicos*. Universidade de Coimbra e Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos, Lisboa: 143-175.

Linsley R K, Kohler M, Paulhus, J L H (1988) *Hydrology for Engineers*. McGraw-Hill, New York.

Loureiro J (1984) Expressão para o cálculo do caudal máximo de cheia em cursos de água de Portugal. *Recursos Hídricos*, vol. 5, 1: 53-78.

Marchi L, Morga M, Preciso E, Gaume E (2010) Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, vol. 394, 1-2: 118-133.

Miller S, Kepner W, Mehaffey M, Hernandez M, Miller R, Goodrich D, Devonald K, Heggem D, Miller P (2002) Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis. *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 38, 4: 915-929.

Moreira N, Silva A, Prates F, Ferreira J, Neto J, Bugalho L, Lopes M J, Mendes M, Frada M J, Pinto P, Cota T, Cabrinha V (2008) *Cheias de 18 de Fevereiro de 2008*, Relatório DMC/CIME-01/2008, Instituto de Meteorologia.

NOAA (2010) *Flash Flood Early Warning System Reference Guide*. COMET Program.

O'Connell P, Ewen J, O'Donnell G, Quinn P (2007) Is there a link between agricultural land-use management and flooding? *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, 1: 96-107.

Pais J, Moniz C, Cabral J, Cardoso J L, Legoinha P, Machado S, Morais M A, Lourenço C, Ribeiro M L, Henriques P, Falé P (2006) Carta Geológica de Portugal, Notícia Explicativa da Folha 34-D Lisboa. Departamento de Geologia, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Lisboa.

Patton P (1988) Drainage Basin Morphometry and Floods. In Baker V, Kochel R C, Patton P (eds.) *Flood Geomorphology*. John Wiley and Sons, New York: 51-64.

Pereira M e Ventura J E (2004) As áreas inundáveis em meio urbano: A abordagem dos instrumentos de planeamento territorial. 7º Congresso da Água, Lisboa.

Perucca L e Angilieri Y E (2010) Morphometric characterization of del Molle Basin applied to the evaluation of flash floods, Iglesia Department, San Juan, Argentina. *Quaternary International*, vol. 233, 1: 81-86.

Portela M M, Silva A T, Melim C P (2000) O efeito da ocupação urbana nos caudais de ponta de cheias naturais em pequenas bacias hidrográficas. 5º Congresso da Água, Lisboa.

Portela M M e Hora G (2002) Aplicação da fórmula racional à análise de cheias em Portugal Continental: valores do coeficiente C. 6º Congresso da Água, Porto.

Portela M M e Dias A T (2003) Regionalização de caudais de cheia em Portugal Continental. *Tecnologia da Água*, 19: 30-39.

Quaresma I (2008) *Inventariação e Análise de Eventos Hidro-Geomorfológicos com carácter danoso em Portugal Continental*. Dissertação de Mestrado em Geografia Física, Especialização em Geografia Física, Recursos e Riscos Ambientais, Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Ramalho M, Pais J, Rey J, Berthou P Y, Alves C A M, Palácios T, Leal N, Kullberg M C (1993) Carta Geológica de Portugal, Notícias Explicativa da Folha 34-A Sintra. Serviços Geológicos de Portugal.

Ramalho M M, Rey J, Zbyszewski G, Matos Alves C A, Palácios T, Moitinho de Almeida F, Costa C, Kullberg M (2001) Carta Geológica de Portugal, Notícia Explicativa da Folha 34-C Cascais, Departamento de Geologia, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.

Ramos C (1994) *Condições geomorfológicas e climáticas das cheias da Ribeira de Tera e do Rio Maior (bacia hidrográfica do Tejo)*. Dissertação de doutoramento em Geografia Física, Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Ramos C e Reis E (2001) As cheias no Sul de Portugal em diferentes tipos de bacias hidrográficas. *Finisterra*, XXXVI, 71: 61-82.

Ramos C (2005a) *Programa de Hidrogeografia*. Linha de Investigação em Dinâmica Litoral e Fluvial (DILIF – 3), Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Ramos C (2005b) Os Recursos Hídricos. In Medeiros C A (dir.) *Geografia de Portugal – o Ambiente Físico*. Círculo de Leitores, Lisboa: 386-415.

Ramos C (2009) *Dinâmica fluvial e ordenamento do território (Programa de Unidade Curricular do 2º Ciclo)*. Núcleo de Investigação em Sistemas Litorais e Fluviais: Dinâmicas, Mudanças Ambientais e Ordenamento do Território (SLIF – 6), Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Ramos, C; Zêzere, J L; Reis, E; Mendonça, J L (2010) Reserva Ecológica Nacional da Área Metropolitana de Lisboa. Quadro de Referência Regional. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo, Lisboa.

Ramos-Pereira A (2003) Geografia Física e Ambiente. In Tenedório J A (coord.) *Atlas da Área Metropolitana de Lisboa*, AML: 45-65.

Rebelo F (2008) Um novo olhar sobre os riscos? O exemplo das cheias rápidas (flash floods) em domínio mediterrâneo. *Territorium*, 15: 7-14.

Reis E (1996) *Aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica na Análise Morfológica de Bacias Hidrográficas*. Dissertação de mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Reis E, Zêzere J L, Vieira G T, Rodrigues M L (2003) Integração de dados espaciais em SIG para avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos. *Finisterra*, XXXVIII, 76: 3-34.

Reis E (2006) *As bacias hidrográficas das Ribeiras da Serra de Grândola – dinâmica hidrológica e factores condicionantes*. Dissertação de doutoramento em Geografia (Geografia Física), Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Rodrigues C (2009) *Risco de inundação: Área das Termas de S. Pedro do Sul*. Dissertação de mestrado em Geografia Física (Ambiente e Ordenamento do Território), Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Rodrigues R, Brandão C, Álvares T (1998) Qual o grau de excepcionalidade das cheias ocorridas no início do ano hidrológico de 1997/1998? 4º Congresso da Água, Lisboa.

Romesburg H C (1984) *Cluster Analysis for Researchers*. Lifetime Learning Publications, Belmont, California.

Roxo M J e Ventura J E (1986) As inundações catastróficas de Novembro de 1983 na Região de Lisboa. In Brito R S (coord.) *Estudos em Homenagem a Mariano Feio*: 391-405.

Saghafian B, Farazjoo H, Bozorgy B, Yazdandoost F (2008) Flood Intensification due to Changes in Land Use. *Water Resources Management*, 22: 1051-1067.

Saraiva M G, Correia F N, Carmo V (1998) Avaliação *ex-post* de medidas não-estruturais de defesa contra cheias na bacia hidrográfica da Ribeira da Lage. 4º Congresso da Água, Lisboa.

Shi P, Ge Y, Yuan Y, Guo W (2005) Integrated Risk Management of Flood Disasters in Metropolitan Areas of China. *Water Resources Development*, vol. 21, 4: 613-627.

Smith J, Baeck M, Morrison J, Sturdevant-Rees P, Turner-Gillespie D, Bates P (2002) The Regional Hydrology of Extreme Floods in an Urbanizing Drainage Basin. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 3: 267-282.

Smith K e Ward R (1998) *Floods. Physical Processes and Human Impacts*. John Wiley and Sons, Chichester.

Uhlenbrook S, Steinbrich A, Tetzlaff D, Leibundgut C (2002) Regional analysis of the generation of extreme floods. In van Lanen H, Demuth S. (eds.) *FRIEND 2002 – Regional Hydrology: Bridging the Gap between Research and Practice*. IAHS Publication nº 274, IAHS Press, Wallingford, Reino Unido: 243-249.

Viessman W, Knapp J, Lewis G, Harbaugh T (1977) *Introduction to Hydrology*. IEP-Dun-Donnelley, Harper & Row, New York.

Zbyszewski G, Moitinho d'Almeida F, Torre de Assunção C (1955) Carta Geológica de Portugal, Notícia Explicativa da Folha 30-C Torres Vedras. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Zbyszewski G (1964) Carta Geológica dos Arredores de Lisboa, Notícia Explicativa da Folha 2 (34-B) Loures. Serviços Geológicos de Portugal, Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos.

Zbyszewski G e Torre de Assunção (1965) Carta Geológica de Portugal, Notícia Explicativa da Folha 30-D Alenquer. Serviços Geológicos de Portugal, Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa.

Zêzere J L (1991) As costeiras a Norte de Lisboa: evolução quaternária e dinâmica actual das vertentes. *Finisterra*, XXVI, 51: 27-56.

Zêzere J L (2005) *Dinâmica de Vertentes e Riscos Geomorfológicos*. Centro de Estudos Geográficos, Relatório Nº 41, Lisboa.

Zêzere J L, Ramos-Pereira A, Morgado P (2005) Perigos Naturais e Tecnológicos no Território de Portugal Continental. X Colóquio Ibérico de Geografia, Évora.

## **SITES CONSULTADOS**

Instituto Geográfico Português - <http://www.igeo.pt/>

Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos - <http://snirh.pt/>

## **LEGISLAÇÃO CONSULTADA**

Decreto-lei nº166/2008, Diário da República, 1ª série – Nº162 – 22 de Agosto de 2008

Decreto-lei nº115/2020, Diário da República, 1º série – Nº206 – 22 de Outubro de 2010